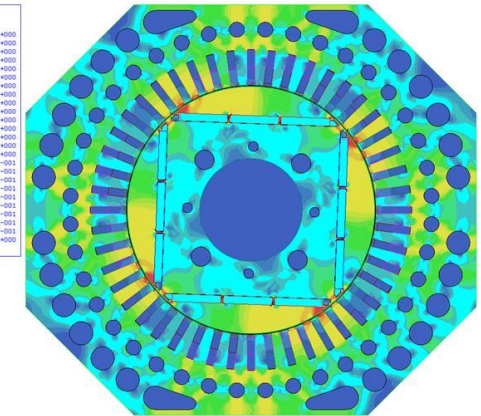
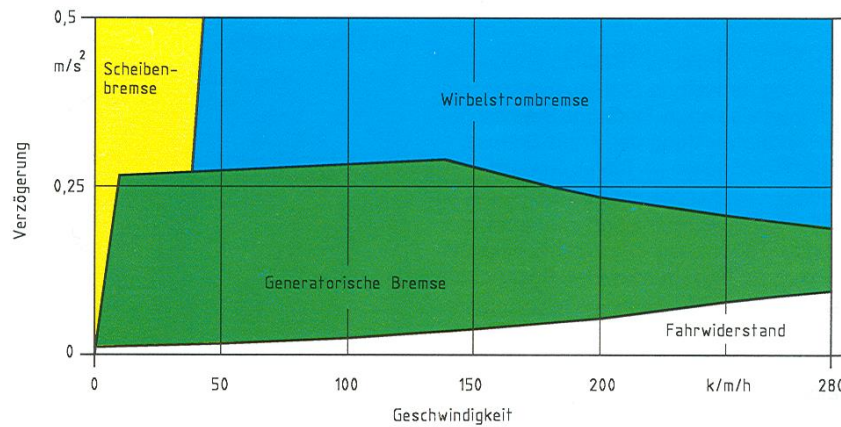
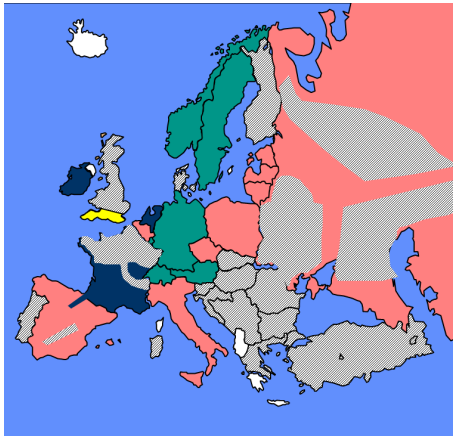


Elektrische Bahnen Teil 1 Theorie



Quelle:
Internet

Quelle: [87]

Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. Harald Neudorfer

Institut für elektrische Energiewandlung / TU – Darmstadt

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe / TU – Wien

Allgemein beideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger

Staatlich befugter und beideter Ziviltechniker für Elektrotechnik

März 2021



Vorlesung 3+0 LV-Nummer: 18-bi-2140-vI TU-Darmstadt

Das vorliegende Skriptum dient als Arbeitsunterlage für die Vorlesung „Elektrische Bahnen“ an der Technischen Universität in Darmstadt. Dabei werden jene Kapitel aus dem großen Bereich von elektrischen Triebfahrzeugen behandelt, die für eine Vorlesung mit 3 Semester-Wochenstunden zeitlich und methodisch möglich sind.

Für den Bereich mechanische Teile (Drehgestelle, Wagenkasten, Bremseinrichtungen, usw.) von Triebfahrzeugen verweise ich auf die Vorlesung von Herrn Dr. Meyer im Sommersemester an der TUD am gleichen Institut. Diese Kapitel werden in der Vorlesung Elektrische Bahnen nur soweit betrachtet, wie es für den didaktischen Aufbau und das Verständnis der Zusammenhänge notwendig erscheint. Das Themengebiet Bahnenergieversorgungssysteme inklusiven den Fahrleitungsanlagen und Schaltanlagen wurde aus dem Skriptum von Herrn Prof. Dr. Zimmert mit seiner freundlichen Genehmigung in diesem Skriptum übernommen.

Ziel dieser Vorlesung ist es neben dem Erwerb von technischen Fakten und Details im Bereich der elektrischen Bahnen, das Interesse für die Besonderheiten bei dieser Antriebstechnik zu wecken.

Meiner Frau Ulrike danke ich für die Mithilfe bei der Erstellung diverser Grafiken und für das Verständnis, die dafür notwendige Zeit für die Vorlesung und deren Vorbereitung zu verwenden. Die vorliegende Fassung bedarf noch einigen Ergänzungen bzw. Korrekturen. Für entsprechende Hinweise bin ich jederzeit dankbar. Weiters danke ich jenen Studenten, die mit ihren Einzelreferaten zu den verschiedensten Themen geholfen haben, das Skriptum zu erweitern bzw. aktualisieren.

Ich hoffe es gelingt mir, Sie von der Faszination der elektrischen Triebfahrzeuge zu überzeugen, und wünsche Ihnen beim Studium viel Erfolg und Freude.

Darmstadt/Traiskirchen, September 2015

Harald Neudorfer



Inhaltsverzeichnis der Vorlesung

Elektrische Triebfahrzeuge Teil 1

Kapitel	Thema	Seite
1	Entwicklung der Elektrischen Bahnen – Grundlagen	4
2	Traktionsmechanik	34
3	Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge	60
4	Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge	101
5	Leistungssteuerung	133
6	Traktionsmaschinen	145
7	Überwachungseinrichtungen	169
8	Bahnenergieversorgungssysteme	178
9	Auslegung von Antriebssystemen	263
10	Beispiele ausgeführter Triebfahrzeuge	Teil 2A Teil 2B
11	Literaturverzeichnis	295



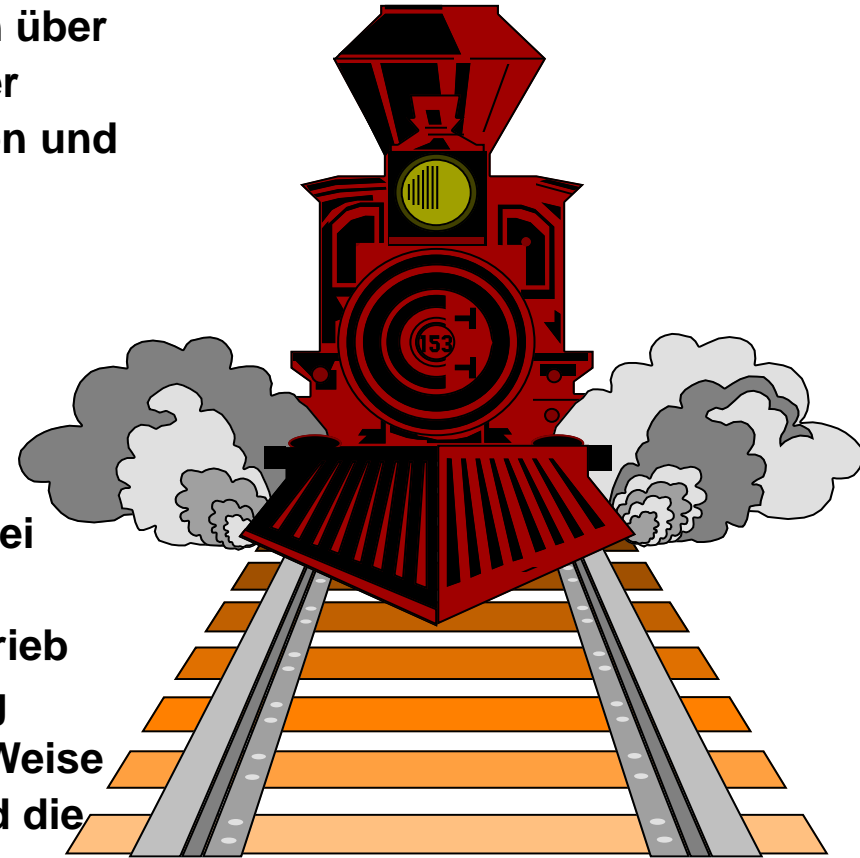
Vorlesungsübersicht

- 1 Entwicklung der Elektrischen Bahnen Grundlagen**
- 1.1 Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Bahnen
- 1.2 Elektrifizierungsmotivation
- 1.3 Vorteile und Nachteile der elektrischen Traktion
- 1.4 Bahnnetze
- 1.5 Situation der Schienenfahrzeugindustrie
- 1.6 Kostenstruktur von elektrischen Triebfahrzeugen
- 1.7 Bahnverwaltungen
- 1.8 Bezeichnungsschemen



Eine "Definition" zu "Was ist Eisenbahn ?"

"Eine Eisenbahn ist ein Unternehmen, gerichtet auf wiederholte Fortbewegung von Personen oder Sachen über nicht ganz unbedeutende Raumstrecken auf metallener Grundlage, welche durch ihre Konsistenz, Konstruktion und Glätte den Transport großer Gewichtsmassen, beziehungsweise die Erzielung einer verhältnismäßig bedeutenden Schnelligkeit der Transportbewegung zu ermöglichen bestimmt ist und durch diese Eigenart in Verbindung mit den außerdem zur Erzeugung der Transportbewegung benutzten Naturkräften (Dampf, Elektrizität, tierischer, menschlicher Muskeltätigkeit, bei geneigter Bahn auch schon der eigenen Schwere der Transportgefäße und deren Ladung usw.) bei dem Betrieb des Unternehmens auf derselben eine verhältnismäßig gewaltige, je nach den Umständen nur in bezweckter Weise nützliche, oder auch Menschenleben vernichtende und die menschliche Gesundheit verletzende Wirkung zu erzeugen fähig ist."



Quelle: Internet

Reichsgericht Leipzig (vor der Jahrhundertwende)



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen- Grundlagen

1.1 Geschichtliche Entwicklung der elektrischen Traktion

- 1825 erste Eisenbahnlinie: Stockton-Darlington Spurweite: 4' 8 1/2" (1435 mm)
- 1879 erste brauchbare elektrische Eisenbahn der Welt: Ausstellungsbahn in Berlin erbaut von Werner v. Siemens, 7 km/h, Leistung 2,2 kW, 150 V Gleichstrom
- 1881 erste elektrische Straßenbahnstrecke in Berlin (Siemens)
- 1895 erste elektrische Vollbahnlokomotive General Electric Co, USA
- 1899 erste drehstromgespeiste Vollbahnlokomotive BBC, Schweiz
- 1903 Schnellfahrversuche in Deutschland mit Drehstrom-Triebwagen von AEG und Siemens, Berlin Marienfelde - Zossen, 210 km/h, 10 kV, 50 Hz,
- 1912 Übereinkommen der Staatsbahnen von Deutschland, Österreich, Schweiz, Schweden, Norwegen zur einheitlichen Verwendung von Einphasenwechselstrom mit 15 kV und 16 2/3 Hz als Versorgungsspannung (Baurat G. Wittfeld)
- 1919 erste Vollbahn mit Gleichspannungsversorgung 1,5 kV in Frankreich
- 1928 erste Vollbahn mit Gleichspannungsversorgung 3 kV in Italien
- 1936 Versuchsbetrieb mit 22 kV 50 Hz-Versorgung auf der Höllentalbahn und Verwendung von Quecksilberdampfgleichrichtern mit Gittersteuerung



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

- 1952 weltweite Elektrifizierung mit Einphasen-Wechselstrom mit 50 Hz beginnend in Frankreich Strecke Valenciennes - Thionville
- 1955 Geschwindigkeitsrekord der Französischen Staatsbahnen (SNCF) mit 331 km/h
- 1964 Strecke Tokio - Osaka planmäßig mit 210 km/h japanische Staatsbahnen
- 1964 erstes Vollbahn-Triebfahrzeug mit Thyristorsteuerung in Schweden
- 1965 Strecke München - Augsburg planmäßig mit 200 km/h der DB
- 1975 erste Straßenbahn mit thyristorgesteuertem Drehstromantrieb (Nürnberg)
- 1979 erste Drehstrom-Vollbahnlokomotive der Welt von der DB
- 1981 Geschwindigkeitsrekord der Französischen Staatsbahnen (SNCF) mit 380 km/h
- 1981 Fahrplanmäßiger Verkehr mit 260 km/h bei der SNCF
- 1988 Geschwindigkeitsrekord der DB mit 407 km/h ICE V
- 1990 Geschwindigkeitsrekord der Französischen Staatsbahnen (SNCF) mit 515 km/h
- 2006 Geschwindigkeitsrekord für Lokomotiven ÖBB 1216 050 mit 357 km/h
- 2007 Geschwindigkeitsrekord der SNCF mit TGV V150 mit 574,79 km/h



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

DC-Bahnen

AC-Bahnen

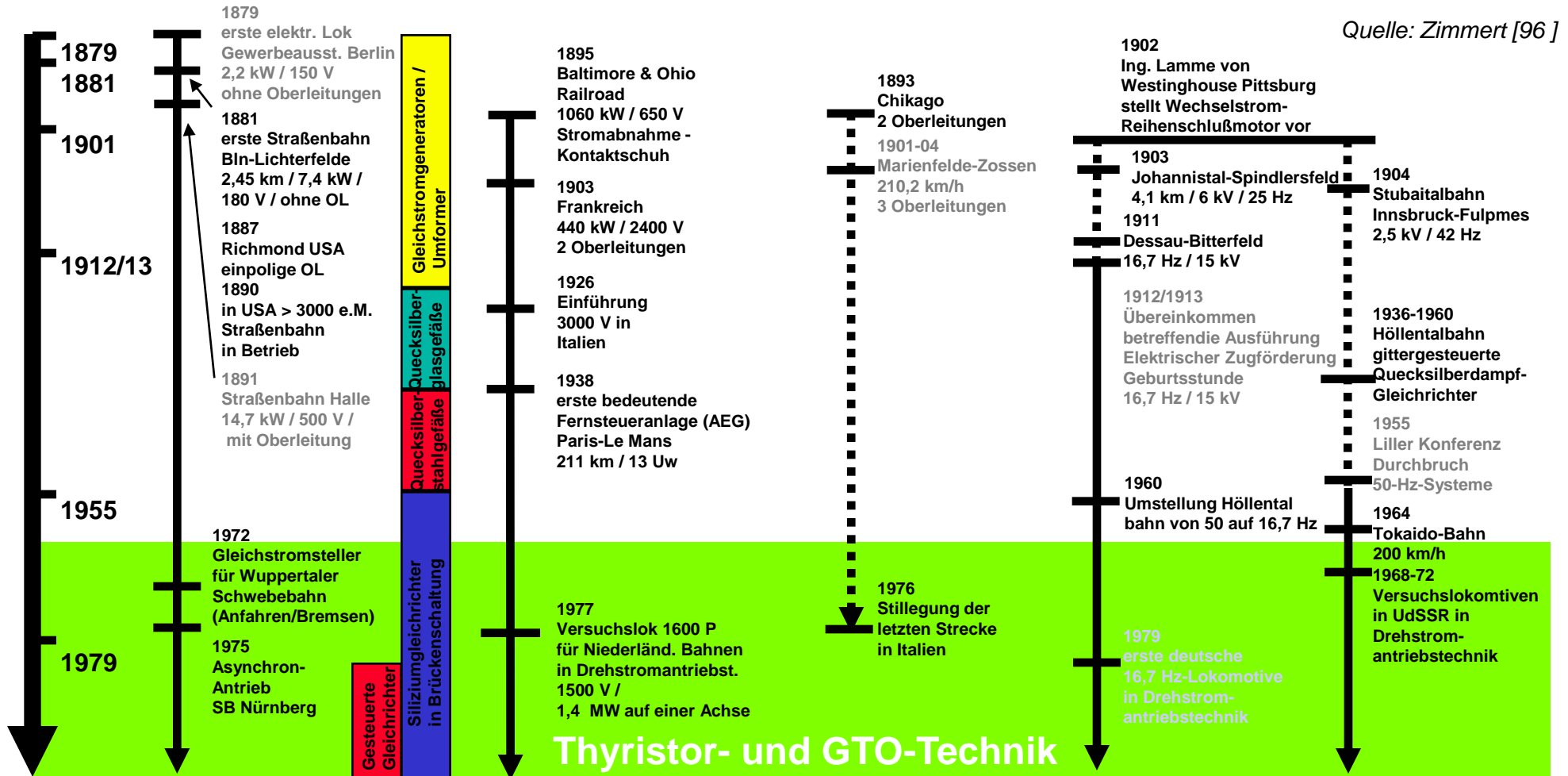
Nahverkehr

Fernverkehr

Drehstrom

16,7 Hz

50 (60) Hz



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

1.2 Elektrifizierungsmotivation

Kostenvergleich - Energievergleich

	Dampftraktion	Dieseltraktion	elektr. Traktion
Betriebskosten	sehr hoch	mittel	klein
Kapitalkosten	keine mehr	mittel	sehr groß
spez. Verbrauchsenergie	12	3	1
Primärenergiebasis	4	1	1

Erzeugung des Bahnstromes in Wärmekraftwerken z.B. DB

Primärenergiebasis	10	2,5	1
--------------------	----	-----	---

Erzeugung des Bahnstromes in Wasserkraftwerken z.B. SBB

Motorwirkungsgrad max.	8 %	40 %	94 %
Fahrzeugwirkungsgrad	6 %	30 %	80 %
max. installierte Leistung	2000 kW	3000 kW	8000 kW



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

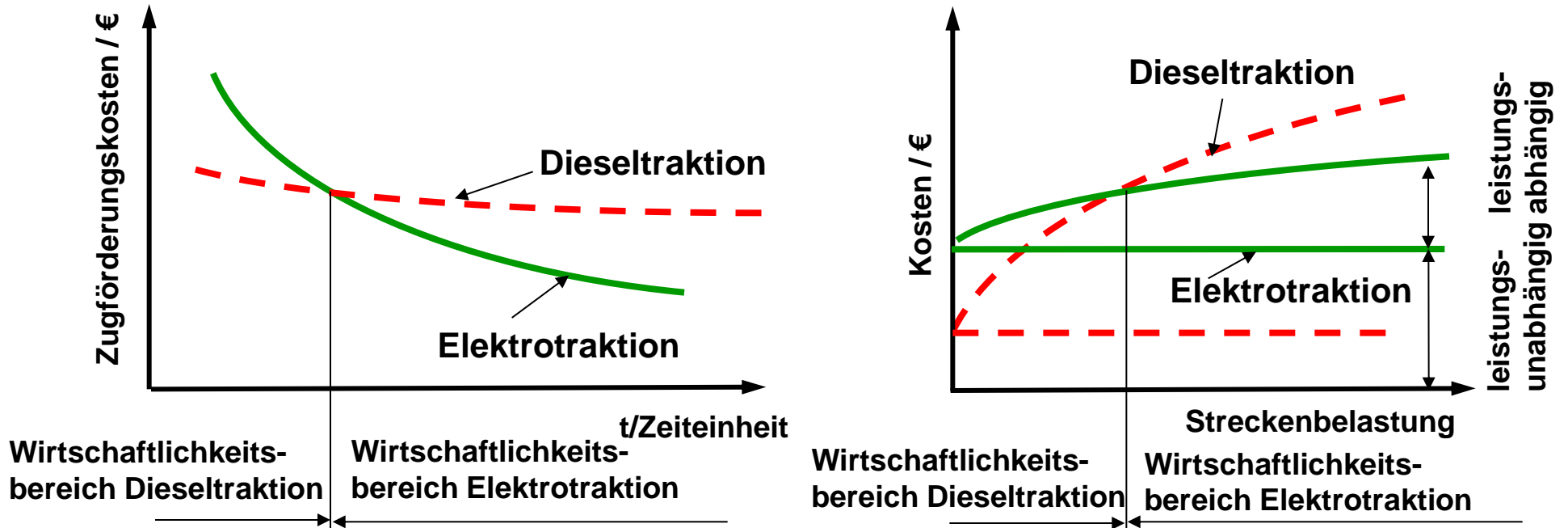


Bild 1.1 Wirtschaftlichkeitsbereich Diesel - Elektrotraktion

Richtwerte für Wirtschaftlichkeitsgrenzen der Streckenelektrifizierung:

Verkehrsarbeit: 12 Mio. tkm/(a.km) entspricht ein Zug von 1 350 t pro Stunde im Flachland, im Gebirge weniger

Energieverbrauch: 300 - 400 MWh/(a.km), abhängig vom Dieselpreis



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Vergleich zwischen Elektro- und Diesel-Traktion Energetischer Wirkungsgrad

Grobstruktur des energetischen Umwandlungsprozesses
Vergleich Elektro- zu Dieseltraktion

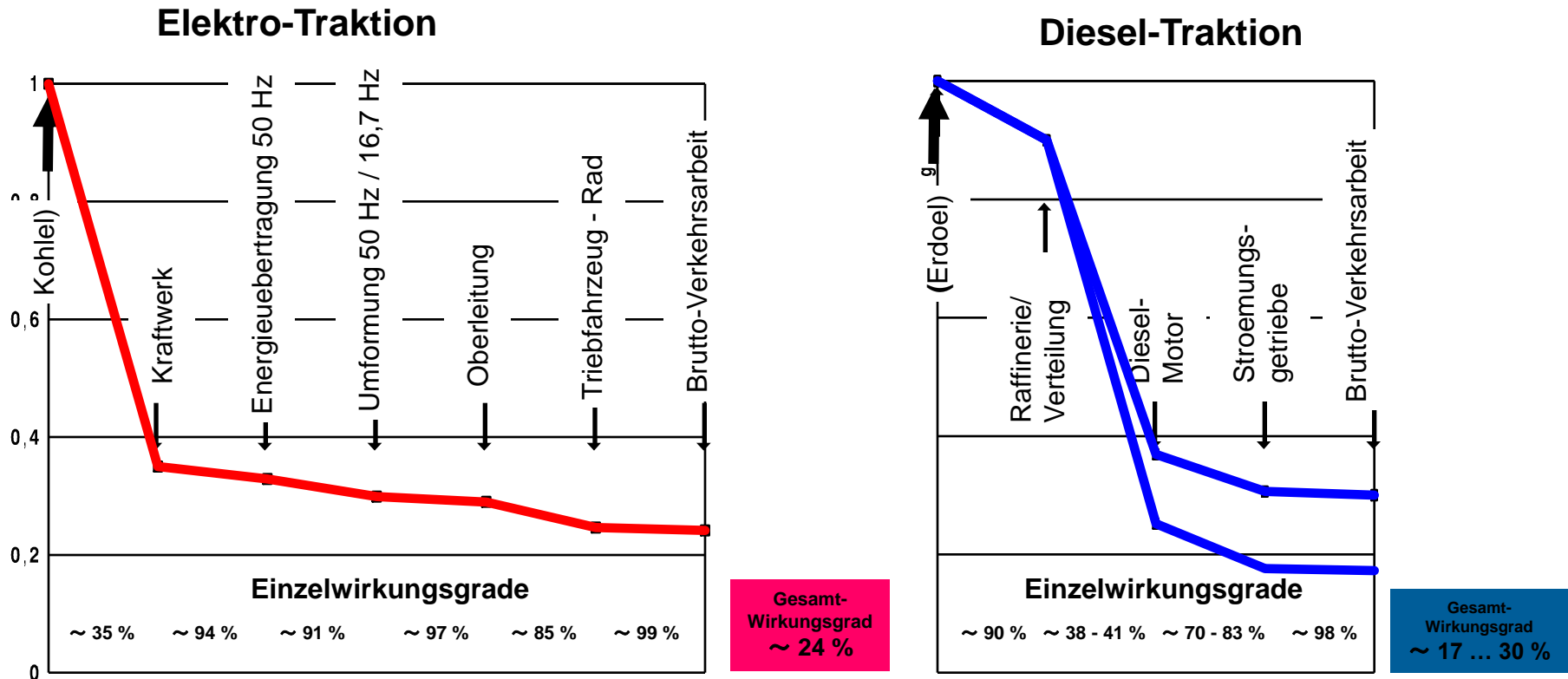


Bild 1.2 Energetische Umwandlungsprozesse für Elektro- und Diesel-Traktion



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

1.3 Vorteile und Nachteile der elektrischen Traktion

- + große Traktionsleistung
 - + hohe Überlastbarkeit der elektrischen Antriebsmaschinen
 - + günstiges Masse-Leistungs-Verhältnis des Triebfahrzeuges
 - + hohe Ausnutzung des Reibwertes
 - + große Anfahrbeschleunigung
 - + Erhöhung der Anhängelasten und der Geschwindigkeit
 - + Steigerung der Streckenbelastung
 - + wirtschaftliche Langläufe
 - + mögliche Verminderung des Fuhrparks und des Personals
 - + Möglichkeit der elektrischen Bremsung und der Energierückgewinnung
 - + geringer spezifischer Primärenergieverbrauch
 - + Möglichkeit der Verwendung jedweder Primärenergie
 - + Umweltfreundlichkeit
- hohe Investitionskosten für Fahrleitungs- und Energieversorgungsnetze



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

1.3 Vorteile und Nachteile der elektrischen Traktion

- + **Große installierbare Leistung auf den Fahrzeuge**
 - ✓ Voraussetzung für Hochleistungs- und High-Speed-Verkehr
 - ✓ Notwendig für Gebirgsstrecken (Schweiz 100 % elektrifiziert)
- + **Unbegrenzte Triebfahrzeugumläufe sind möglich**
 - ✓ Energie ist immer verfügbar (soweit elektrifiziert)
- + **Keine Emissionen entlang der Eisenbahnstrecke**
 - ✓ Emission wird in Kraftwerke verlagert
- + **Niedriger Lärmpegel**
- + **Geringere Instandhaltungskosten**
 - ✓ Anzahl der Verschleissteile ist deutlich niedriger



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Bahnenergieversorgungssystem - Grundanforderungen

Sicherung einer ununterbrochenen Energiezufuhr zu den elektrischen Triebfahrzeugen

- o Kontaktverhalten Stromabnehmer-Kettenwerk / Konstruktion Oberleitung / Ausfallstrategie

**Die Elektroenergie ist den Triebfahrzeugen mit einer bestimmten Qualität zuzuführen
(Spannung / Frequenz / usw.)**

- o Auslegung Unterwerke / Oberleitungsbeseilung / Oberleitungsschaltung

(Ununterbrochene) Aufnahmebereitschaft des Bahnnetzes für anfallende Bremsenergie

- o Rückspeisefähigkeit Unterwerke / Spannungsniveau in der Oberleitung

Die Übertragungsverluste im System der Bahnenergieversorgung sollen minimal gehalten werden

- o Oberleitungsschaltung / Unterwerksschaltung

Die installierte Leistung der einzelnen elektrotechn. Betriebsmittel ist so zu bemessen, dass diese bei den größten auftretenden Lastspitzen nicht beschädigt werden

- o optimale Auslegung der Unterwerke und Oberleitungsanlagen



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Umwelteigenschaften moderner Transportmittel

Eigenschaft	Einheit	PKW	ICE	A320
spezifischer Energiebedarf	kWh/100Pkm	48,7	10,3	62,8
CO ₂ - Emission	kg/100Pkm	12,29	4,75	17,0
NO _x - Emission	g/100Pkm	133	3,8	88
CO - Emission	g/100Pkm	209	0	20
Kohlenwasserstoff - Emission	g/100Pkm	27	0	8
Ruß - Emission	g/100Pkm	0	1	
Flächenbedarf bei gleicher Leistungsfähigkeit (Neubau)	%	285	100	170
Schallpegel in 25 m Abstand	dB(A)	73	92	

Anmerkung: PKW mit Otto- Motor
Beim ICE wurden die Emissionen der versorgenden Kraftwerke
anteilig berücksichtigt



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

1.4 Bahnnetze

Vollbahnnetze

Bahnstromsysteme (Fernbahnstrecken) weltweit (2001) ca. 233 500 km elektrifiziert, 1997 waren es 183 000 km. Das entspricht einem Zuwachs von ca. 28%.

	Jahr	Strecken-km		Anteil	Änderung
		2001	1997		
Gleichstrom 1,5 kV		21 000	20 000	9 %	5 %
Gleichstrom 3,0 kV		72 000	70 000	31 %	3 %
Einphasenwechselstrom 15 kV 16 2/3 Hz		37 500	33 000	16 %	14 %
Einphasenwechselstrom 25 kV 50 Hz		93 000	60 000	40 %	55 %
Andere Stromsysteme (Nahverkehrstrecken)		19 700			
U-Bahn, Straßenbahn, Stadtbahn		500 – 750 V			
S-Bahn		1200 – 1800V			



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

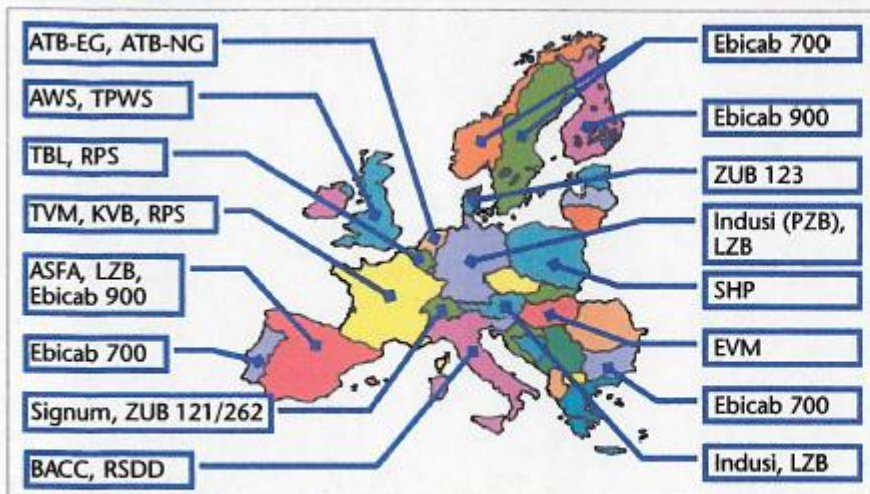


TABELLE 1
Fahrmotor-Kenndaten (Bild 1).

		10 HW 895	4 FXA 7085
SBB-Lokomotive		Re 4/4 II	Re 460
erstes Lieferjahr ¹		1967	1991
AC-Phasenzahl		1	3
Frequenz	Hz	16 ² / ₃	0 ... 140
Polzahl		10	4
Masse ²	kg	3900	2260
Dauerleistung	kW	1113	1200
Höchstdrehzahl	min ⁻¹	1600	4180

¹ jeweils erste Serie
² ohne Ritzel

Quelle: Zeitschrift:
Ele. Bahnen

Bild 1.3 Zugsicherungssysteme bei europäischen Bahnen, dazu Luxemburg mit RPS, Tschechien mit LS90 und weitere.

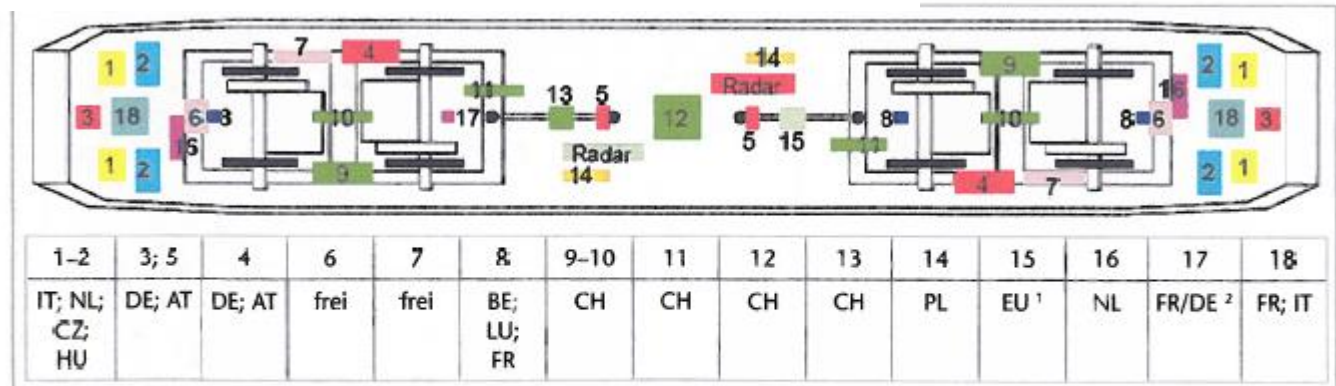


Bild 1.4 Kontakt- und Antennenplatzierungen für 15 Zugsicherungssysteme aus elf mitteleuropäischen Ländern zuzüglich Euro-Balise für ETCS in den Drehgestellen oder unter dem Fahrzeugboden (Ländercode nach ISO 3166). ¹ Euro-Balise für ETCS ² für Mehrsystem



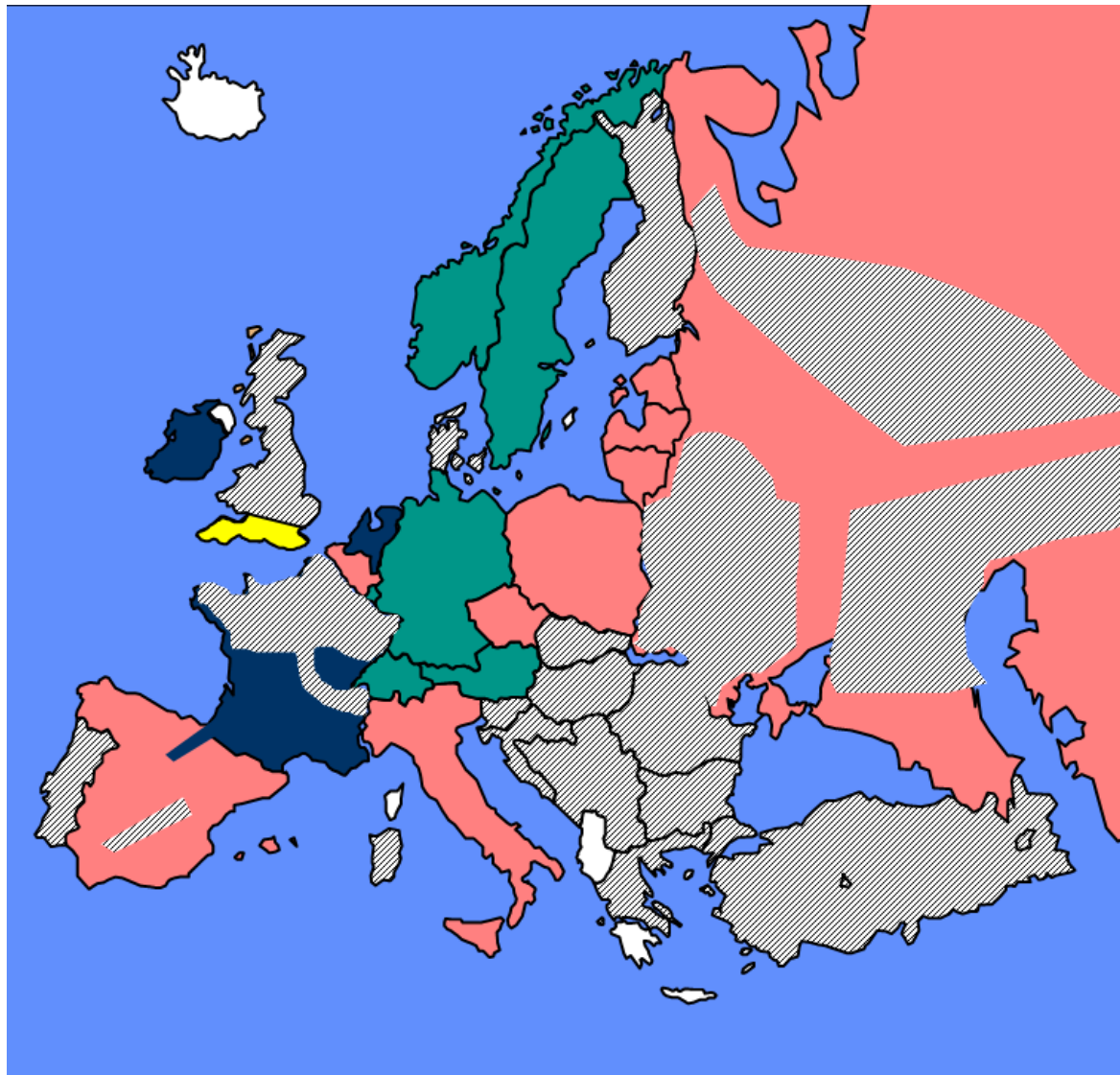
1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Bahnstromsysteme

Gleichstrom:	0,5-0,8 kV:	Straßen- und U- Bahnen
	0,8-1,8 kV:	Schnell- und Vorortebahnen
	1,5kV:	Frankreich, Niederlande, Japan
	3 kV:	Polen, Tschechische Republik, Slowakische Republik, Italien, Spanien, Belgien, Russland
Wechselstrom:	15 kV, 16 2/3 Hz:	Deutschland, Schweiz, Österreich, Norwegen, Schweden
	25 kV, 50 Hz:	Frankreich, Russland, Tschechische Republik, Slowakische Republik, Ungarn, Rumänien, Bulgarien, Dänemark, Finnland, Portugal, Luxemburg, Großbritannien, China, Indien, Neuseeland, Südkorea
	25kV, 60 Hz:	USA, Kanada



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen



- 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz
- 25 kV 50 Hz
- 3,0 kV Gleichstrom
- 1,5 kV Gleichstrom
- 1200 V Gleichstrom

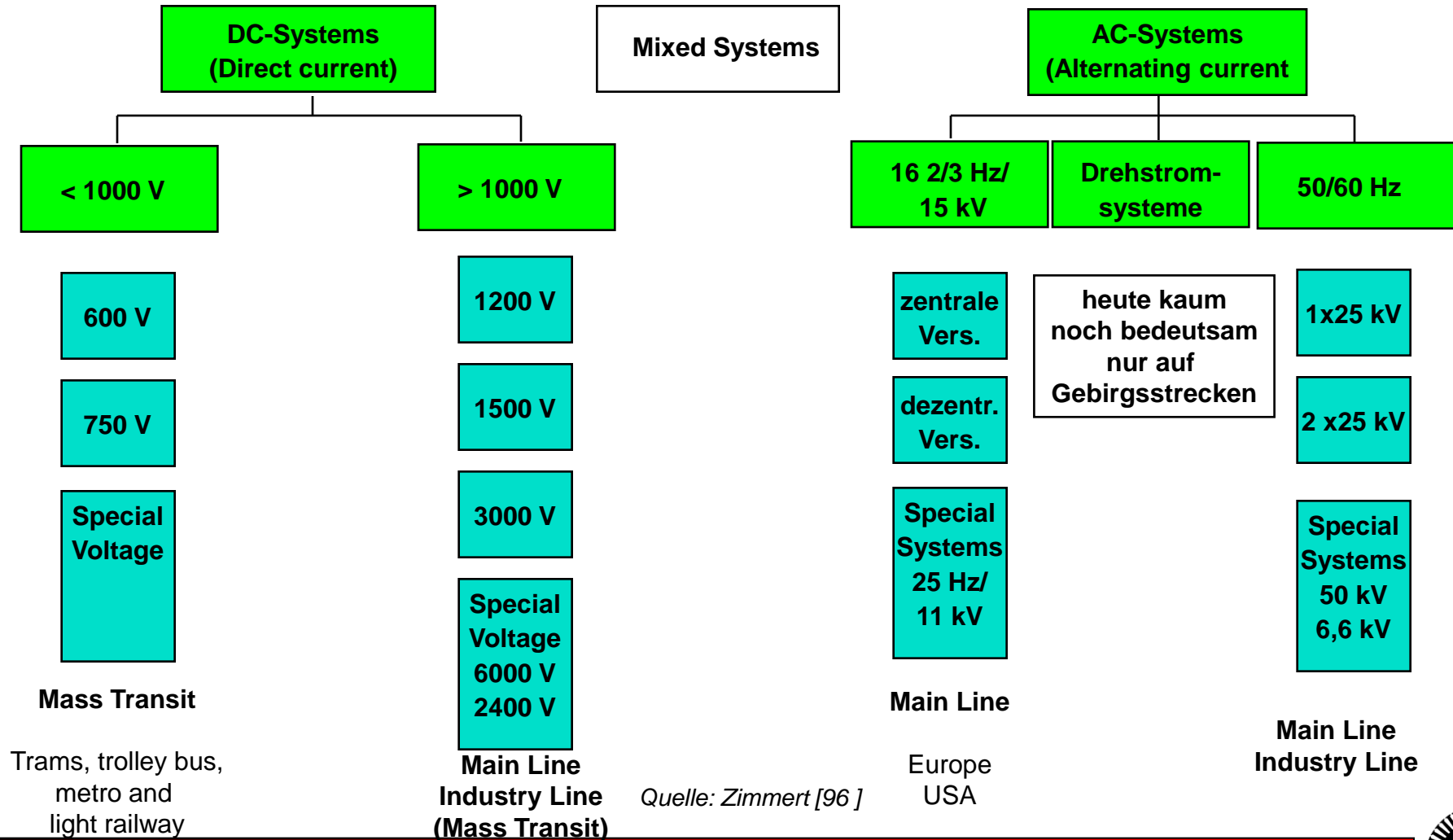
Bild 1.5 Bahnstromversorgung in Europa

Quelle: Internet



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Bahnenergieversorgungssysteme, Struktur - Bevorzugte Systeme und ihr Haupteinsatz



Quelle: Zimmert [96]



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Europäische Spannungssysteme elektrischer Bahnen nach EN 50 163

Stromart	U_n [V]	$U_{\min 2}$	$U_{\min 1}$	$U_{\max 1}$	$U_{\max 2}$	$U_{\max 3}$
DC 600V	600		400	720	770	1015
DC 750V	750		500	900	950	1215
DC 1,5 kV	1500		1000	1800	1950	2538
DC 3,0 kV	3000		2000	3600	3900	5075
AC 15 kV 16.7 Hz	15000	11000	12000	17250	18000	24311
AC 25 kV 50 Hz	25000	17500	19000	27500	29000	38746

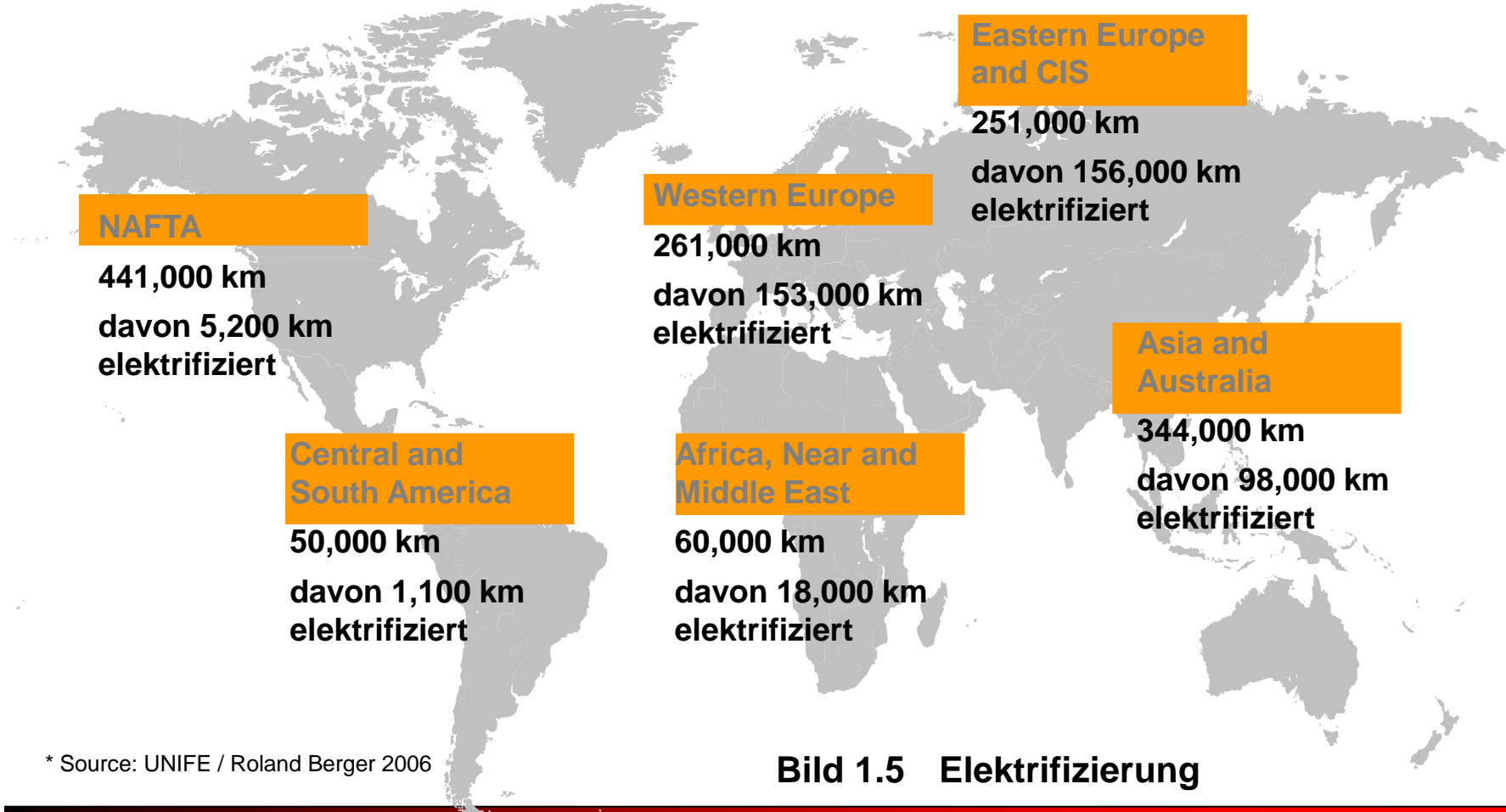
U_n	Nennspannung
$U_{\min 1}$	niedrigste Dauerspannung
$U_{\min 2}$	niedrigste nicht permanente Spannung, max. 10 min Dauer
$U_{\max 1}$	höchste Dauerspannung
$U_{\max 2}$	höchste nicht permanente Spannung, max. 5 min Dauer
$U_{\max 3}$	Überspannungsspitze von max. 20 ms Dauer



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Elektrifizierung weltweit*

Eisenbahnnetz weltweit 1,292,000 Streckenkilometer, incl. 33 % elektrifiziert



* Source: UNIFE / Roland Berger 2006

Bild 1.5 Elektrifizierung



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Stand der Elektrifizierung 2006

Region	Strecken – km	Elektrifizierte Strecke in km	Anteil der El. Strecke	Vgl. zu 1990
Welt	1 370782			
Albanien	447	0		
Belgien	3536	2950	83 %	+20 %
Bosnien-Herzegowina	1 021	795	78 %	
Bulgarien	4294	2710	63 %	
Dänemark	2944	636	22 %	+15 %
Deutschland	48215	20278	42 %	+3 %
Estland	968	132	14 %	
Finnland	5741	2619	46 %	
Frankreich	29370	14778	50 %	+15 %
Griechenland	2571	764	30 %	
Großbritannien	16567	5361	32 %	+4 %
Irland	3237	37	1 %	



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Region	Strecken – km	Elektrifizierte Strecke in km	Anteil der El. Strecke	Vgl. zu 1990
Island	0			
Italien	19460	11354	58 %	+3 %
Kroatien	2726	1199	44 %	
Lettland	2347	270	12 %	
Liechtenstein	18,5	18,5	100 %	
Litauen	1998	122	6 %	
Luxemburg	274	242	88 %	
Malta	0			
Mazedonien	699	223	32 %	
Moldawien	1300	0		
Monako	1,7	0		
Niederlande	2801	2064	74 %	
Norwegen	4178	2518	60 %	+0 %
Österreich	6383	3772	59 %	+1 %
Polen	23072	11910	52 %	+10 %
Portugal	2786	1351	48 %	+35 %
Rumänien	10789	3965	34 %	
Russland	87157	40300	46 %	+10 %



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Region	Strecken – km	Elektrifizierte Strecke in km	Anteil der El. Strecke	Vgl. zu 1990
San Marino	0			
Schweden	11528	7527	65 %	-9 %
Schweiz	4839	4470	92 %	-7 %
Serbien/ Montenegro	4059	1364	34 %	
Slowakei	3662	1588	43 %	
Slowenien	1201	499	42 %	
Spanien	14974	8819	59 %	
Tschechien	9597	3041	32 %	
Türkei	8697	1920	22 %	
Ukraine	21852	9648	44 %	
Ungarn	7875	2628	33 %	+4 %
Vatikan	0,86	0		
Weißrussland	5523	875	16 %	
Zypern	0			



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Region	Strecken – km	Elektrifizierte Strecke in km	Anteil der El. Strecke	Vgl. zu 1990
Australien	38550	4330	11 %	+4 %
Algerien	3973	283	7 %	
Argentinien	31902	167	5 %	+4 %
Ägypten	5063	62	1 %	
Bangladesch	2768	0	0 %	
Brasilien	29295	1998	7 %	-1 %
Chile	6585	1317	20 %	-8 %
China	75438	20151	27 %	+18 %
Ghana	953	0	0 %	
Indien	63221	17508	28 %	+16 %
Indonesien	6458	125	2 %	+0 %
Iran	8367	146	2 %	
Japan	23474	16615	71 %	+12 %
Kuwait	0			
Kanada	48068	0	0 %	-1 %
Malaysia	1890	207	11 %	
Mexiko	17665	0	0 %	
Nigeria	3505	0	0 %	



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

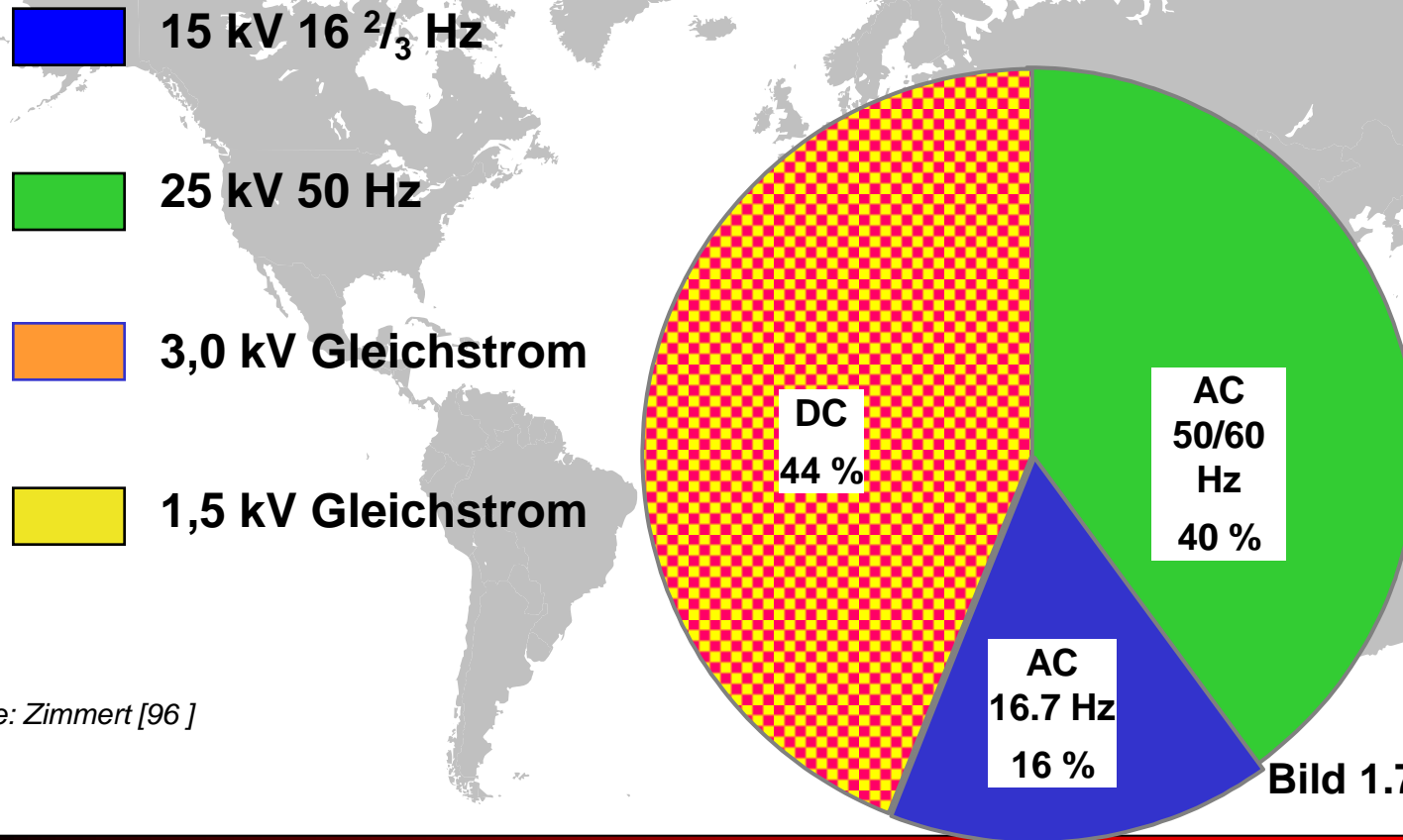
Region	Strecken – km	Elektrifizierte Strecke in km	Anteil der El. Strecke	Vgl. zu 1990
Pakistan	8163	293	4 %	
Philippinen	897	0		
Saudi Arabien	1392	0		
Süd Korea	6549	962	15 %	
Thailand	4071	0		
USA	226612	6812	3%	+1 %
Afrika			ca. 15 %	
Asien			ca. 20 %	+8 %
Australien			ca. 11 %	+4 %
Europa	236436		ca. 45 %	+8 %
Nordamerika			ca. 1 %	
Südamerika			ca. 5%	



1 Entwicklung der Elektr. Bahnen - Grundlagen

Elektrifizierung weltweit*

Eisenbahnnetz elektrifiziert weltweit: ca. 293,000 Streckenkilometer (2010)



Quelle: Zimmert [96]

Bild 1.7 Elektrifizierung



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

1.5 Situation der Bahnindustrie

Konzentrationsprozess 1980 - 2004

Siemens Transportation: Kraus Maffei, SGP(A), Krupp VT, DÜWAG Uerdingen, MATRA S.A. (F), Friedmann (A), SAEL, Integra (CH)

Bombardier Transportation: BBC (CH,D,I), TIBB (I), MF- Oerlikon (CH), Secheron (CH), (Bombardier + ADtranz) ASEA (S), ABB- Henschel (D), AEG, LEW Hennigsdorf, AWTS, MAN, Westinghouse TS, Thyssen-Henschel, Waggon-Union, Brel (GB), MAN-MBB, Garrett (USA), Bombardier (CAN), Talbot, DWA, ANF- Industrie (F), Prorail Ltd. (GB), Hägglund (S), Strömberg (F), ELTA (PL),

Alstom Transportation: SACM Belfort, MTE Schneider (F), DeDietrich (F), FIAT Ferrov. (I), Linke-Hofmann-Busch, GEC Traction (GB)

weitere Hersteller:

General Electric (GE) Transportation Systems (USA), Ansaldo Breda (I), Brush Traction (GB), GANZTRAND (U), Skoda (CR), TALGO S.A. (E), Vossloh Kiepe (D), Hitachi, Kawasaki, Mitsubishi, Toshiba, Toyo Denki (J), Daewoo (Südkorea), General Motors EMD CAN/USA), Zhuzhou (VR China), Traktionssysteme Austria TSA (A), Stadler AG (CH), CAF (E), PESA (PL), Medha (Indien), Medcom (PL)...



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

1.6 Kostenstruktur von elektrischen Triebfahrzeugen (Stand 2001)

Hochleistungslokomotive:	5 - 7 MW	2,5 - 3,0 Mill. €
Dieselelektrische Lokomotive:	2 - 3 MW	2 Mill. €
U- Bahnzug:		2 - 2,5 Mill. €
Straßenbahn:		2 - 2,5 Mill. €
Verhältnis Mechanischer : Elektrischer Anteil	40 : 60	
Motor und Getriebe für Hochleistungslok 1,6 MW:		50 - 70.000 €
Motor und Getriebe für Straßenbahn 100 kW:		15 - 20.000 €

Kosten der Elektrifizierung (Umbaukosten Abhängigkeit von Streckencharakter)

Triebfahrzeuge	45%		
Ortsfeste Anlagen		Änderungsarbeiten	
Stromversorgung	9%	Licht- und Kraftanlagen	2%
Bahnstromleitungen	5%	Sicherungs- und Fernmeldeanlagen	5%
Unterwerke	5%	Profilfreimachung u. bauliche Anlagen	5%
Fahrleitungsanlagen	22%	Werkstätten	1%
Allgemeine Kosten	1%		



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

1.7 Bahnverwaltungen

AN	Australische Staatsbahnen	Australian National Railways
BDŽ	Bulgarische Staatsbahnen	Bălgarski Dăržani Źeleznici
BR	Britische Staatsbahn	British Railways
BVG	Berliner Verkehrsgesellschaft	
CP	Portugiesische Staatsbahnen	Comoios de Portugal
CPTM	Zugsystem Sao Paulo	Companhia Paulista de Trens Motropolitanos
CRRC	Chinesische Staatsbahnen	China Railway Rolling Stock Company
CSD	Tschechische Staatsbahnen	Ceskoslovenske Statny Drahy
DB	Deutsche Bahn AG	
DR	Deutsche Reichsbahn (DDR 1945 - 1993)	
DRG(P.St.B)	Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft (Preussische Staatseisenbahn)	
DSB	Dänische Staatsbahn	Danske Statsbaner
ER	Egyptian Railways	
FS	Italienische Staatsbahn	Ferrovie dello Stato
HHA	Hamburger Hochbahn AG	
IR	Indische Staatsbahnen	Indian Railways



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

JRC	Japanische Staatsbahnen	Japanese Railway Co
JZ	Jugoslawischen Staatsbahnen	Zajednica Jugoslovenskih Zeleznica
Korail	Südkoreanische Staatsbahnen	Korail Railroad Corporation
LHB	Linke-Hofmann-Busch GmbH (jetzt: Alstom Transport Deutschland)	
MAV	Ungarische Staatsbahnen	Magyar Allamvasutak
NS	Niederländische Staatsbahnen	NV Nederlandse Spoorwegen
NSB	Norwegische Staatsbahnen	Norges Staatsbaner
NTV	Italienische Eisenbahn (privat)	Nuovo Trasporto Viaggiatori
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen	
OSE	Griechische Staatsbahnen	Organismos Sidirodromon Ellades
PB	Pilatusbahn (Schweiz)	
PKP	Polnische Staatsbahnen	Polskie Koleje Panstwowe
RENFE	Spanische Staatsbahnen	Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles
RŽD	Russische Staatsbahnen	Rossijskije schelesnyje dorogi
SBB	Schweizer Bundesbahnen	
SJ	Schwedische Staatsbahnen	Statens Järnväger
SNCB	Belgische Staatsbahnen	Société Nationale des Chemins de fer Belges



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

SNCF	Französische Staatsbahnen	Société Nationale des Chemins de fer Français
SRO	Saudiarabische Staatsbahnen	Saudi Railway Organization
SWM	Stadtwerke München	
TCDD	Türkische Staatsbahnen	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollari
Trenitalia	Italienische Staatsbahnen	Trenitalia
UZ	Ukrainische Staatsbahnen	Ukrajinski Sylisnyzi
VGf	Stadtwerke Vekehrsgesellschaft Frankfurt am Main	
VR	Finnische Staatsbahnen	Valtionrautatiet
WVB	Wiener Verkehrsbetriebe	
UIC	Internationaler Eisenbahnverband	Union Internationale des Chemins de Fer
EBO	Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung	
ESBO	Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurfahrzeuge	
BOStrab	Bau - und Betriebsordnung für Straßenbahnen	
EBOA	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Anschlussbahnen	



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

1.8 Bezeichnungsschemen

DB (seit 1968)

XXX YYY Z z.B. 101 021 - 4

XXX Baureihe

Gruppe 0xx Dampflokomotiven

Gruppe 1 xx elektr. Lokomotiven

Gruppe 2xx Diesellokomotiven

Gruppe 3xx Kleinlokomotiven

Gruppe 4xx elektr. Triebwagen

Gruppe 5xx Akkumulator- Triebwagen

Gruppe 6xx Dieseltriebwagen

Gruppe 7xx Schienenbusse, Dienst- und Sonderfahrzeuge

Gruppe 8xx Bei-, Mittel- und Steuerwagen für Elektr. - u. Akku-Triebw.

Gruppe 9xx Bei-, Mittel- und Steuerwagen für Diesel - Triebwagen

YYY Ordnungsnummer

Z Kontrollziffer

Kontrollziffer:

218 311

Triebfahrzeugnr.

121 212 x

Multiplikationsfaktoren

228 612

Multiplikationsprodukte

2+2+8+6+1+2=21

Quersumme

30 - 21 = 9

Kontrollziffer

30: nächste volle Zehner

218 311-9

vollständige Tfiz-Nr.



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

Bezeichnungsschema der ÖBB

XXXX YYY Z

z.B. 1014 013 - 5

Kontrollziffer:

1014 013

Triebfahrzeugnr.

XXXX Baureihe

1212 121 x

Multiplikationsfaktoren

Gruppe 0xx

Dampflokomotiven

1018 023

Multiplikationsprodukte

Gruppe 1xxx

elektr. Lokomotiven

1+0+1+8+0+2+3=15

Quersumme

Gruppe 2xxx

Diesellokomotiven

20 - 15 = 5

Kontrollziffer

Gruppe 3xxx

Dampftriebwagen

20: nächste volle Zehner

Gruppe 4xxx

Elektrotriebwagen

1014 013 - 5

vollständige Tfiz-Nr.

Gruppe 5xxx

Dieseltriebwagen

Gruppe 6xxx

Steuerwagen zu Elektro- und Dieseltriebwagen

Gruppe 7xxx

Zwischenwagen und Triebwagenanhänger

Gruppe 8xxx

Diensttriebwagen für nicht öffentlichen Personenverkehr

Gruppe 9xxx

Tender zu Dampflokomotiven

X

Kleinlokomotiven

YYY Ordnungsnummer

Z Kontrollziffer



1 Entwicklung der Elektr. Traktion - Grundlagen

Bezeichnungsschema von Triebfahrzeugen der Schweiz

- A** Normalspurige Lokomotiven mit über 80 km/h, Triebwagen mit Abteil 1. Klasse
- B** Normalspurige Lokomotiven mit 70 - 80 km/h, Triebwagen mit Abteil 2. Klasse
- C** Normalspurige Lokomotiven mit 60 - 65 km/h, Triebwagen mit Abteil 3. Klasse
- D** Normalspurige Lokomotiven mit 45 - 55 km/h, Triebwagen mit Gepäckabteil
- E** Normalspurige Rangierlokomotiven
- F** Historische Triebwagen mit Gepäckabteil
- G** Schmalspurige Adhäsionslokomotiven
- H** Reine Zahnradlokomotiven aller Spurweiten
- HG** Schmalspurige Lokomotiven für gemischten Adhäsions- und Zahnradbetrieb
- R** Normalspurige Triebfahrzeuge mit erhöhter Kurvengeschwindigkeit und über 110 km/h
- Z** Triebwagen mit Postabteil
- a** Elektr. Triebfahrzeuge mit Speisung ab mitgeführter Akkumulatoren
- e** Elektr. Triebfahrzeuge mit Speisung ab Fahrleitung oder Stromschiene
- f** Triebfahrzeuge mit Funksteuerung
- h** Triebfahrzeuge für Zahnradbetrieb
- m** Triebfahrzeuge mit Verbrennungsmotor
- X/Y** X angetriebenen Achsen / Y gesamte Anzahl der Achsen, z.B.: 4/6 oder 4/4
z.B.: Re 4/4, Ge 4/4, Ce 6/8 (Krokodil), Be 4/6 (Züricher Straßenbahn)



Vorlesungsübersicht

- 2** **Traktionsmechanik**
- 2.1 Grundbegriffe der Spurführung
- 2.2 Fahrdiagramm
- 2.3. Fahrwiderstände
- 2.3.1 Fahrzeugwiderstand
- 2.3.2 Streckenwiderstand
- 2.3.3 Beschleunigungswiderstand
- 2.4 Zugkraftgleichung
- 2.5 Kraftübertragung Rad - Schiene
- 2.6 Z-v-Diagramm, B-v-Diagramm
- 2.7 Leistungsauslegung, Energiebedarfsermittlung



2 Traktionsmechanik

2.1 Grundbegriffe der Spurführung

Normalspur	1435 mm: Europa außer Spanien, Portugal, Russland, Finnland
Breitspur	1524 mm: Russland, Finnland 1668 mm: Spanien, Portugal
Schmalspur	1000 mm: Nebenbahnen und Straßenbahnen 1067 mm: Kapspur Afrika und Asien 760 mm: Bosnische Spurweite 750 mm: Nebenbahnen, Gebirgsbahnen

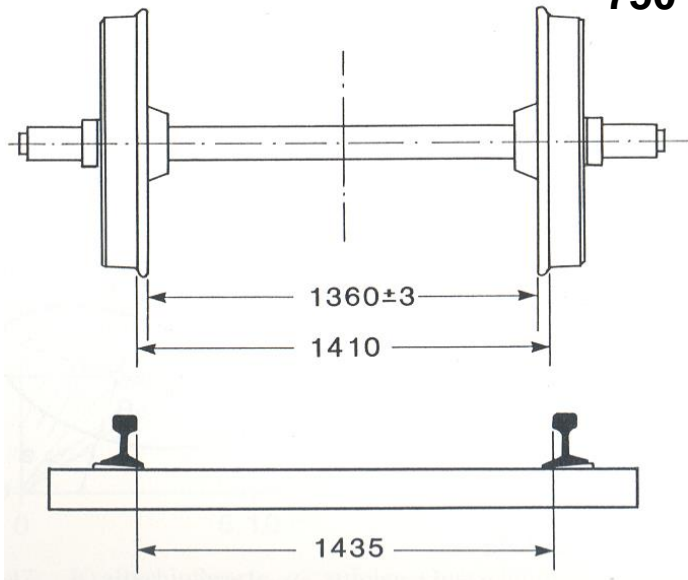


Bild 2.1 Spurweiten und sonstige Abstände für Normalspur [77]

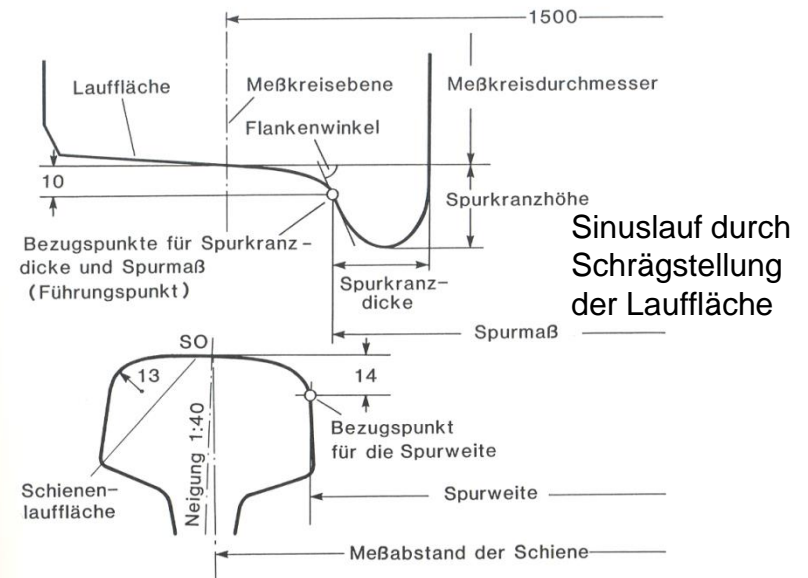


Bild 2.2 Radreifen- und Schienenprofil für Normalspur [77]



2 Traktionsmechanik

Spurweiten in verschiedenen Ländern

	Gesamtstrecke	Spurart	Spurweite	km	Anteil
Finnland:	5741 km	Breitspur	1524 mm	5741	100%
Griechenland:	2571 km	Schmalspur	1000 mm	1565	61%
Portugal:	2786 km	Breitspur	1668 mm	2603	93%
Russland:	87157 km	Breitspur	1524 mm	86000	99%
Schweiz:	4839 km	Schmalspur	1000 mm	1268	26%
Spanien:	14974 km	Breitspur	1668 mm	11919	80%
		Schmalspur	1000 mm	1928	13%
Australien:	38550 km	Breitspur	1600 mm	3727	10%
		Schmalspur	1067mm	14074	37%
Brasilien:	29295 km	Breitspur	1600 mm	4932	17%
		Schmalspur	1000 mm	23773	81%
Indien:	63221 km	Breitspur	1676 mm	46807	74%
		Schmalspur	1000 mm	13290	21%



2 Traktionsmechanik

Spurweiten der Gleise

mm	gebräuchlich in den Ländern	mm	gebräuchlich in den Ländern
2134	die alte GWR (Großbritannien)	914	Kolumbien, Kuba, die östlichen Vereinigten Staaten, Großbritannien, Mexiko, Peru, San Salvador
1829	Moskau-St. Petersburg, Erie-Linien (Vereinigte Staaten)	900	Österreich, Deutschland, Portugal
1676	Indien, Sri Lanka, Argentinien, Chile	891	Schweden
1672	Spanien, Portugal	826	Großbritannien
1600	Brasilien, Irland, Australien	800	Schweiz, Schweden
1524	Russland, Rumänien, China, Finnland	785	Finnland, Deutschland
1435	Europa, Vereingte Staaten, Uruguay, Peru, Afrika	762	Großbritannien, Brasilien, Kapprovinz, Sri Lanka, Zypern, Japan, Mexiko, Nigeria
1300	Brasilien	760	Österreich, Bulgarien, Jugoslawien, Polen
1270	Chile	750	Algerien, Argentinien, Estland, Ungarn, Lettland, Norwegen, Polen, Schweiz, Tansania
1190	Ostindien	724	Großbritannien
1118	Spanien	711	Großbritannien
1090	Schweden	700	Luxemburg
1067	Afrika, Chile, Kolumbien, Australien, Ungarn, Japan, Norwegen, Neuseeland, Sudan, Venezuela, Tasmanien, Russland	686	Großbritannien
1050	Palästina, Algerien	610	Indien, Japan, Vereinigte Staaten, Tasmanien, Südafrika, Venezuela
1000	Europa (ausgen. Großbritannien), Südafrika, Mexiko, Peru, Senegal, Uganda, Venezuela	600	Großbritannien, Marokko, Frankreich
950	Italien		



2 Traktionsmechanik

Umspuren mittels Drehgestelltausch



Quelle: Internet

**Bild 2.3 Umspuranlage in Brest:
von Spurweite 1435 mm auf 1524 mm
Hochheben des Wagenkastens und
Tausch der Drehgestelle**

2 Traktionsmechanik

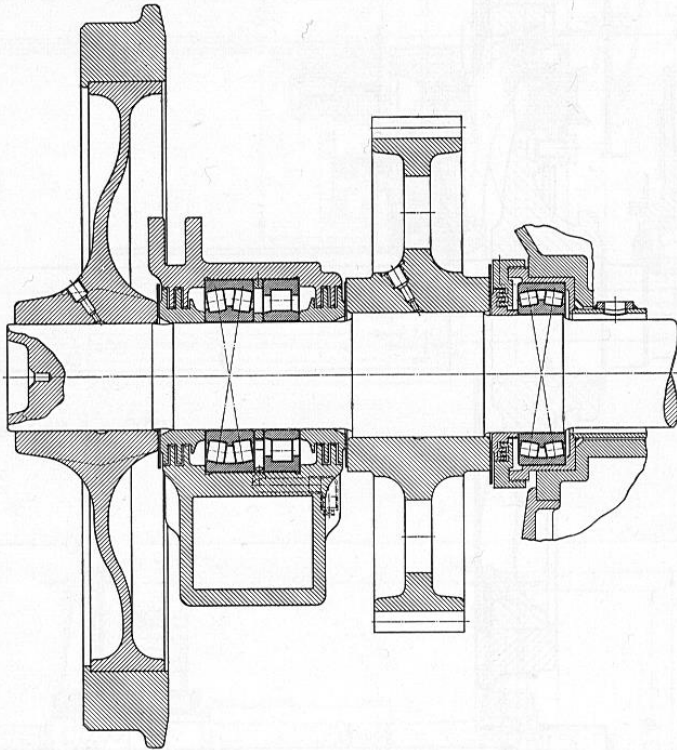


Bild 2.4 Radsatz mit Innenlagerung eines Straßenbahntriebwagens [77]

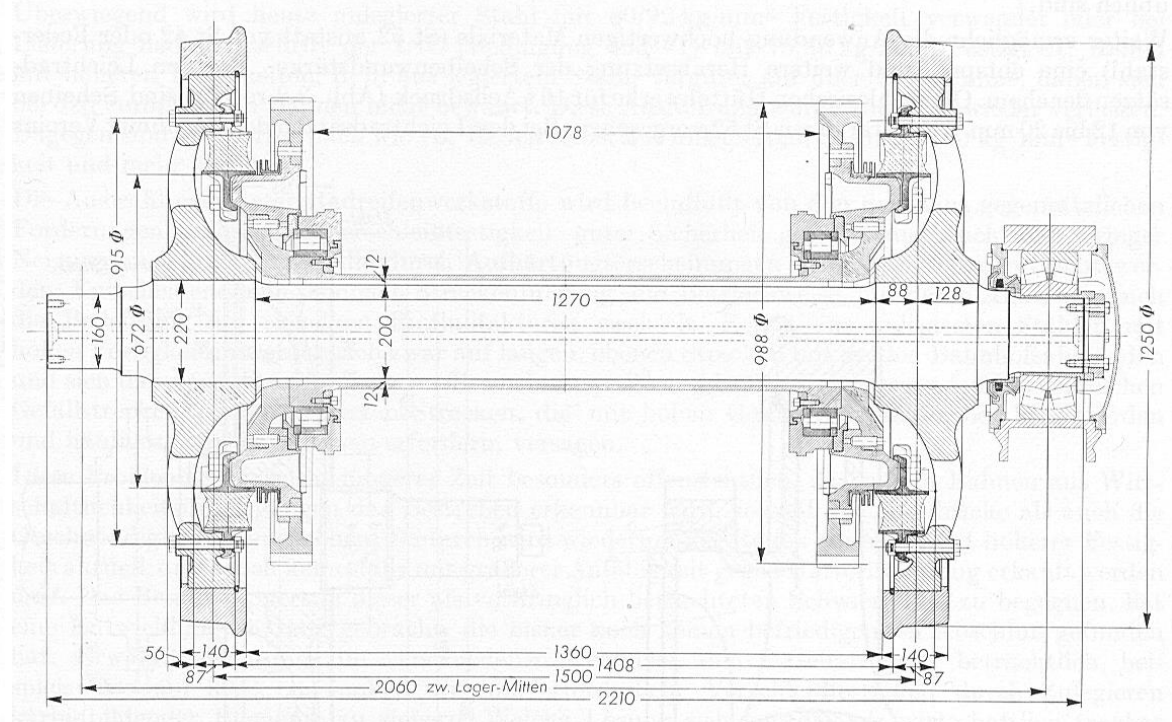


Bild 2.5 Radsatz der BR 1042 der ÖBB Bo`Bo` Lokomotive [77]

Radsatzlast: 16 - 22,5 t : normalspurige Vollbahn in Europa
10 - 16 t : meterspurige Nebenbahnen
bis 10 t : Straßenbahnen
30 - 35 t : Vollbahn in USA

2 Traktionsmechanik

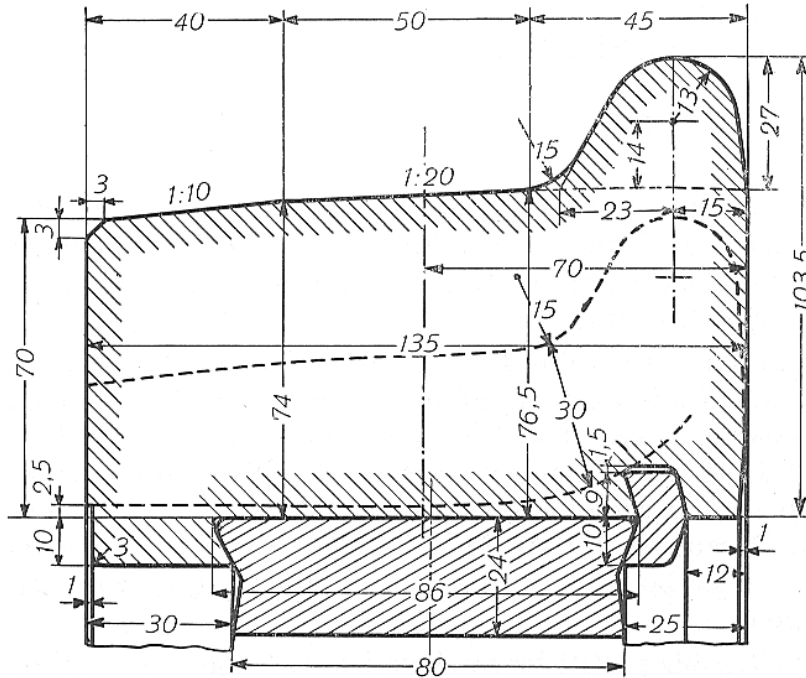


Bild 2.6 Reifenprofil für Vollbahn-Triebfahrzeug [77]

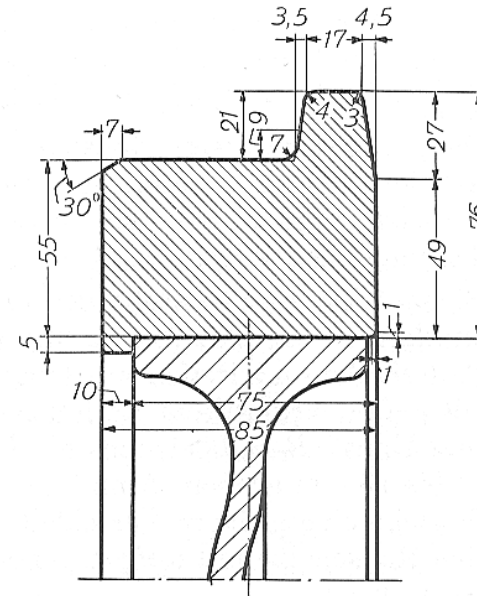


Bild 2.7 Reifenprofil für Straßenbahntriebwagen [77]

Typischer Radreifendurchmesser:

Straßenbahn: 500 - 700 mm

S- Bahn: 700 - 900 mm

Lokomotive: 1000 - 1300 mm

Typische Radreifenbreiten:

Straßenbahn: 80 - 90 mm

Lokomotive: 130 - 150 mm



2 Traktionsmechanik

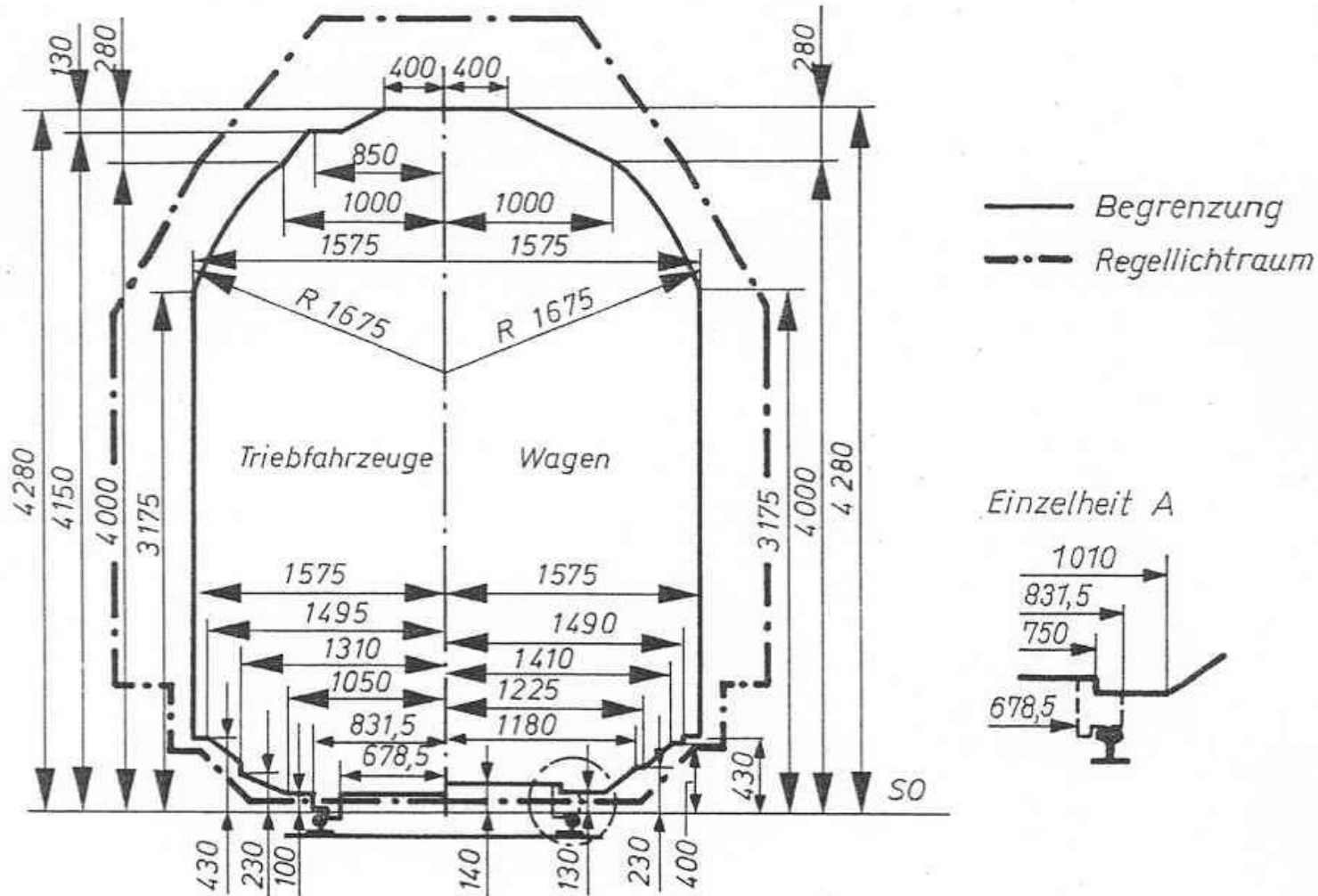


Bild 2.8 Begrenzung der Fahrzeuge nach EBO für Normalspur [77]



2 Traktionsmechanik

2.2 Fahrdiagramm

Typische(r)	Haltestellen- abstand km	max. Ge- schwindigkeit km/h	mittlere Ge- schwindigkeit km/h	mittlere Lauf- leistung/Jahr 10 ³ km
Straßenbahn:	0,3- 0,7	70 - 80	20 - 30	40 - 80
U- Bahn:	0,5 - 2,0	80 - 100	30 - 35	50 - 100
S- Bahn:	2 - 4	120 -140	40 - 60	80 - 140
Regionalbahn:	5 - 15	140 - 160	60 - 100	120 - 220
HV-Bahn:	> 50	250 - 350	160 - 250	250 - 500

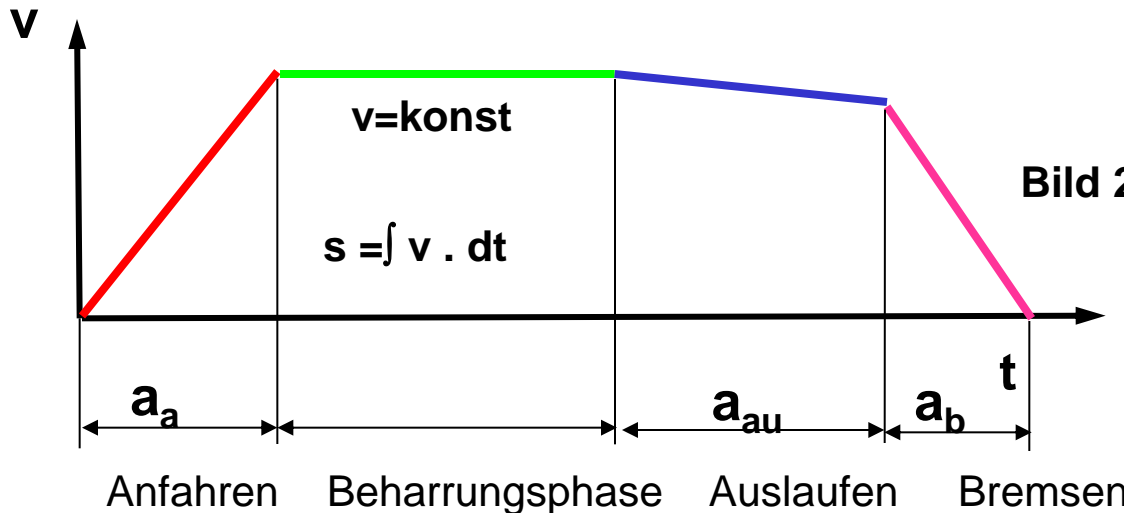


Bild 2.9 Typisches Geschwindigkeit-Zeitdiagramm für Triebfahrzeuge



2 Traktionsmechanik

Land	Zug	von	nach	s	t	v
				km	min	km/h
Frankreich	TGV	Lille	Roissy	203,4	48	253,3
	TGV	Roissy	Lyon	453,9	118	230,8
Spanien	AVE	Madrid	Sevilla	470,5	135	209,1
	AVE	Sevilla	Cordoba	126,8	41	185,5
Deutschland	ICE	Würzburg	Fulda	93,2	28	199,7
	ICE	Stuttgart	Mannheim	107,5	37	174,3
England	Scott Pu	London	York	303,3	101	180,2
	IC225	Stevenage	Doncaster	206,6	70	177,2
Schweden	X2000	Göteborg	Stockholm	441,2	161	164,4
Italien	Pendolino	Firenze	Roma	261,0	95	164,9
International	Eurostar	Paris	Waterloo	494,5	173	171,5

Tabelle 2.10 Geschwindigkeiten Europäischer HGV- Züge (Sommer 1997)



2 Traktionsmechanik

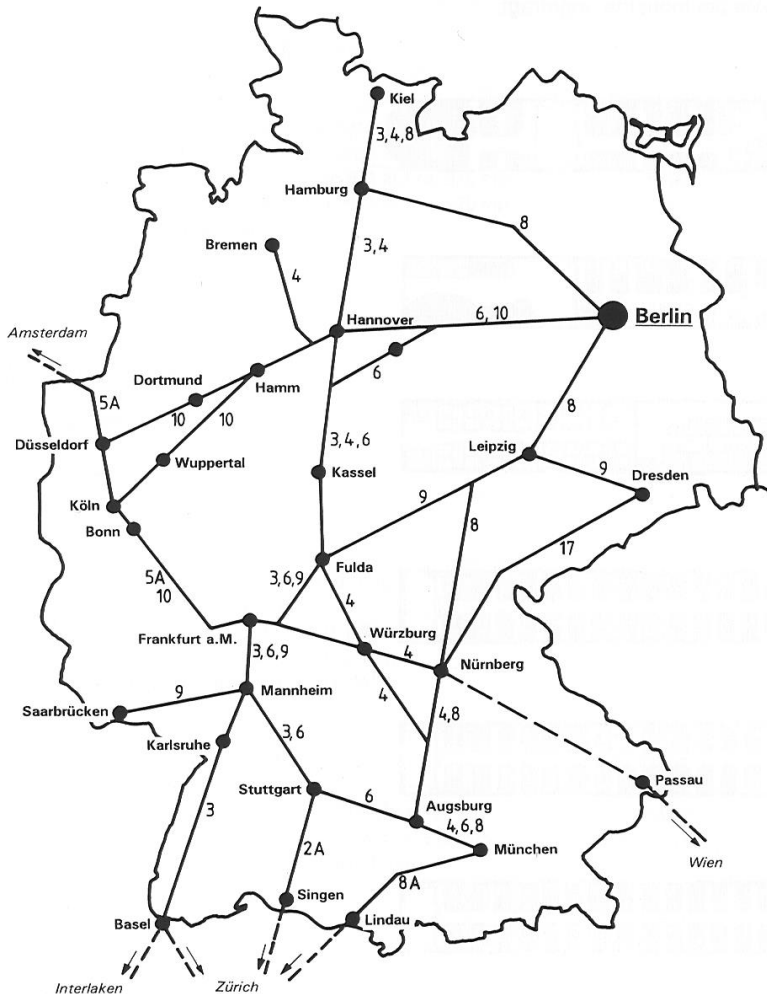


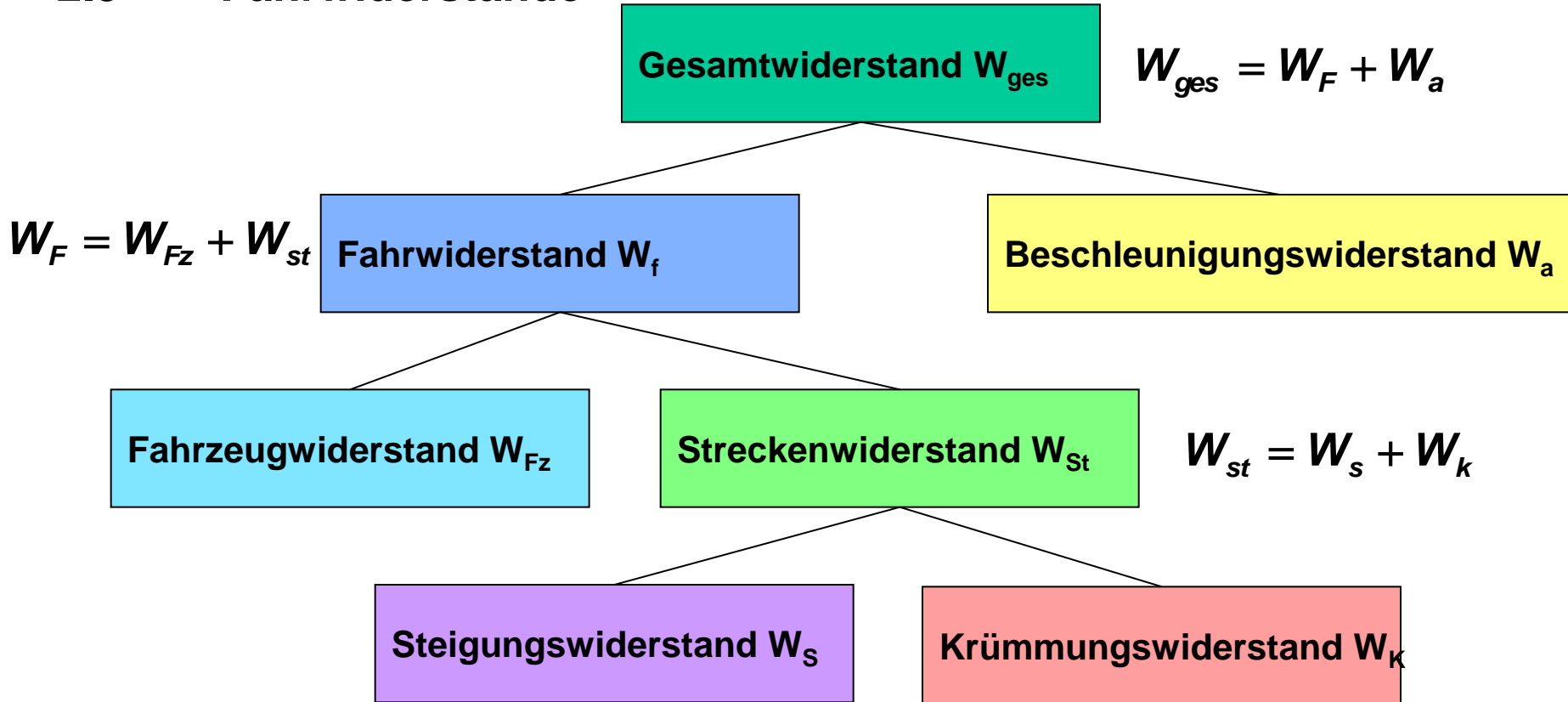
Bild 2.11 ICE-Verbindungen in D
Stand 10.Juni 2001 [15]

- | | | |
|----|--|---------------|
| 2A | Stuttgart - Singen (- Zürich) | ICE T |
| 3 | (Kiel -) Hamburg - Hannover - Kassel - Fulda - Frankfurt a. M. - Mannheim - Stuttgart/ - Basel (- Zürich/Interlaken) | ICE 1 |
| 4 | Hamburg - Hannover - Kassel - Fulda - Würzburg - Augsburg - München/ - Nürnberg (- Wien) - Augsburg - München | ICE 1 |
| 5A | (Frankfurt a. M. -) Köln - Amsterdam (Gemeinschaftsbetrieb DB/NS) | ICE 3M |
| 6 | Berlin - Braunschweig - Kassel - Fulda - Frankfurt a. M. - Mannheim - Stuttgart - München | ICE 1 - ICE 2 |
| 8 | (Kiel -) Hamburg - Berlin - Leipzig - Nürnberg - München | ICE T |
| 8A | München - Lindau (- Zürich) | ICE TD |
| 9 | Dresden - Leipzig - Erfurt - Fulda - Frankfurt a. M. - Mannheim - Kaiserslautern - Saarbrücken | ICE T |
| 10 | Berlin - Hannover - Hamm - Dortmund - Düsseldorf - Frankfurt a. M. - Würzburg - Nürnberg - München | ICE 1 |
| 10 | Berlin - Hannover - Hamm - Dortmund - Düsseldorf/ - Wuppertal - Bonn | ICE 2 |
| 17 | Nürnberg - Hof - Chemnitz - Dresden | ICE TD |



2 Traktionsmechanik

2.3 Fahrwiderstände



Widerstand = Fahrzeugmasse · Erdbeschleunigung · Spezifischer Widerstand

$$W_x = m \cdot g \cdot w_x$$

Einheitengleichung: N = kN · N/kN



2 Traktionsmechanik

2.3.1 Fahrzeugwiderstand

spezifischer Fahrzeugwiderstand

$$W_f = C_0 + C_1 \cdot v + C_2 \cdot v^2$$

$$w_f = 2,5 + k(v + \Delta v)^2 \cdot 10^{-3} \quad \text{in N/kN}$$

k	
0,25	Schnellzüge, Eilzüge
0,33	gewöhnliche Personenzüge
0,4	Eilgüterzüge
0,5	gewöhnliche Güterzüge
1,0	leere Güterzüge

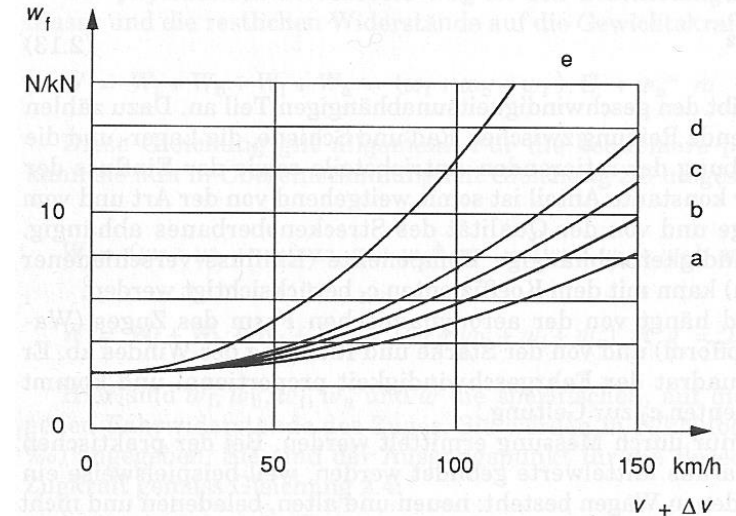


Bild 2.12 Spezifischer Fahrwiderstand nach angepasster Formel von Strahl [23]

	km/h	60	80	120	160	180
Vollbahnen	N/kN	3 - 4	4 - 6	7 - 8	9- 10	11-12
Straßenbahnen	N/kN	5 - 12				

Bei Fahrgeschwindigkeiten über 150 km/h sind die allgemeinen Formeln nicht zuverlässig.

	km/h	200	300
Tokaido - Zug 6 Wagen	N/kN	11,4	
TGV- Zug 5 Wagen	N/kN	8,6	17,0
ICE/V- Zug 4Wagen	N/kN		13,6



2 Traktionsmechanik

2.3.2 Streckenwiderstand

$$W_{st} = W_s + W_k$$

2.3.2.1 Steigungswiderstand (Neigungswiderstand)

$$W_s = m \cdot g \cdot \sin \beta$$

$$w_s = \frac{W_s}{m \cdot g} = s \quad \text{in N/kN}$$

spezifischer Steigungswiderstand:

$$w_s = \pm s \quad s [\text{‰}]$$

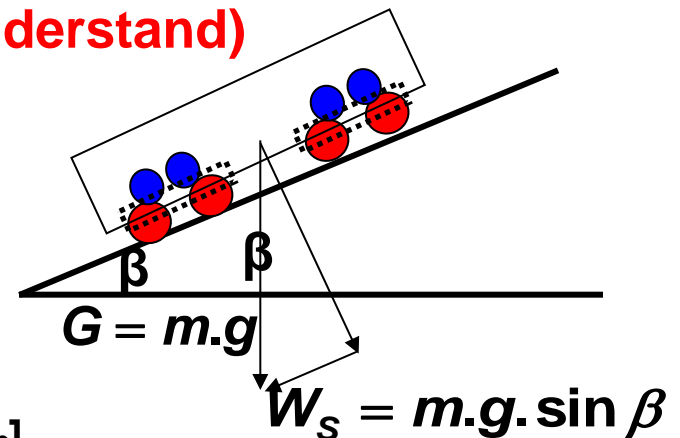


Bild 2.13 Steigungswiderstand

typische Steigungen

Bahnen im Flachland	0-12 ‰
Normalspurige Bahnen im Gebirge	25 ‰
Schmalspurige Bahnen im Gebirge	50 ‰
Zahnradbahnen	60 -250 ‰



2 Traktionsmechanik

2.3.2.2 Krümmungswiderstand (Bogenwiderstand)

$$w_K = \frac{K}{r} \quad \text{in N/kN} \quad r \text{ Krümmungsradius in m}$$

Der Koeffizient K berücksichtigt die Spurweite.

Spurweite	K	Spurweite	K
1435 mm	750	750 mm	400
1000 mm	530	600 mm	325

Die Fliehkräfte bewirken erhöhte Führungskräfte zwischen Rad und Schiene und Seitenbeschleunigungen für die Reisenden. Diese können durch Überhöhung der äußeren Schiene teilweise kompensiert werden. Der nicht kompensierte Wert der Seitenbeschleunigung sollte ca. $0,8 \text{ m/s}^2$ nicht überschreiten.

typische Krümmungsradien

Hochgeschwindigkeitsstrecken	200 - 300 km/h	3000 - 5000 m
Normalspurige Strecken im Flachland	160 km/h	1200 m
Normalspurige Alpentransversalen	80 km/h	300 m
Schmalspurige Strecken	50 km/h	120 m



2 Traktionsmechanik

2.3.3 Beschleunigungswiderstand

$$W_a = m \cdot a \cdot 10^3 + \sum J_i \left(\frac{2i_i}{D_i} \right)^2 \cdot a = m \cdot \xi \cdot a \cdot 10^3$$
$$w_a = \frac{a}{g} \cdot \xi \cdot 10^{-3} \quad \text{in N/kN}$$

Berücksichtigung der Rotationsenergie (Drehmassenzuschlag ξ)

antriebslose Wagen der Adhäsionsbahnen	1,02 - 1,12
elektr. Triebwagen	1,08 - 1,12
elektr. Lokomotive	1,15 - 1,30
elektr. Lokomotive der Zahnradbahn	1,50 - 3,50
ganze Züge inkl. Triebfahrzeuge	1,06 - 1,10

übliche Beschleunigungswerte

schwere Güterzüge	0,02 - 0,1 m/s ²
gewöhnliche Güterzüge	0,1 - 0,2 m/s ²
Reisezüge	0,3 - 0,4 m/s ²
Schnelltriebzüge im Fernverkehr	0,4 - 0,7 m/s ²
Stadtschnellbahn	0,8 - 1,2 m/s ²
U- Bahn und Straßenbahn	1,0 - 1,3 m/s ²



2 Traktionsmechanik

2.4 Zugkraftgleichung

Widerstände in N

$$W_{ges} = W_a + W_F$$

$$W_F = W_{Fz} + W_{st}$$

$$W_{st} = W_s + W_k$$

$$W_{ges} = m \cdot g \cdot \left[\frac{a}{g} \cdot \xi \cdot 10^{-3} + 2,5 + k \cdot v^2 \cdot 10^{-3} + s + \frac{K}{r} \right]$$

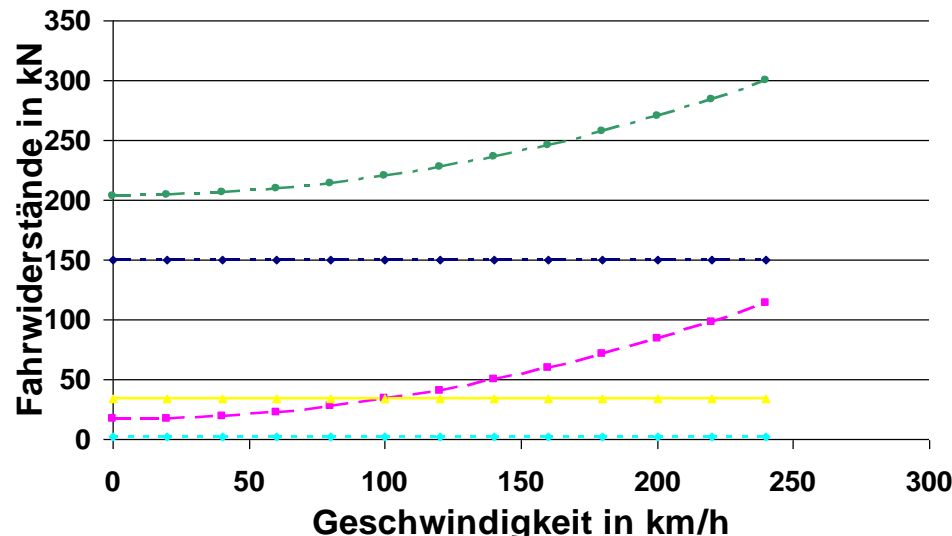
spezifischen Widerstände in N/kN

$$w_a = \frac{a}{g} \cdot \xi \cdot 10^{-3}$$

$$w_f = 2,5 + k(v + \Delta v)^2 \cdot 10^{-3}$$

$$w_s = s \quad w_k = \frac{K}{r}$$

Beispiel: $m_L = 84 \text{ t}$
 $m_W = 600 \text{ t}$
 $a = 0,2 \text{ m/s}^2$
 $\xi = 1,1$
 $k = 0,25$
 $s = 5 \text{ ‰}$
 $K = 750$
 $r = 2000 \text{ m}$



- ◆— Beschleunigungswiderstand
- Fahrzeugwiderstand
- ▲— Steigungswiderstand
- ◆— Krümmungswiderstand
- Gesamtwiderstand

Bild 2.14 Fahrwiderstände



2 Traktionsmechanik

2.5 Kraftübertragung Rad - Schiene

$$\mu = \frac{7,5}{v + 44} + 0,161$$

v in km/h

nach Curtius und Kniffler

Haftwert bei Kraftschluß μ

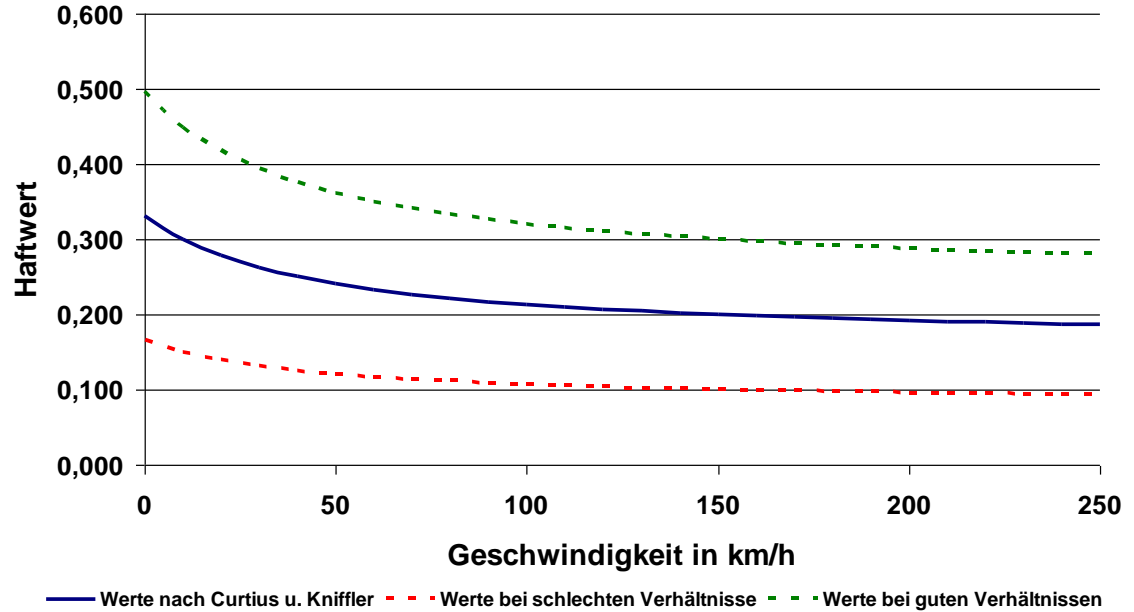


Bild 2.15 Haftwerte nach Curtius und Kniffler mit Streubereich

extrem gute Bedingungen 0,5
 sehr gute Adhäsionsverhalten 0,4
 bei trockener Schiene und mittlere Verhältnissen

v in km/h	0	40	80	130	200
μ	0,33	0,25	0,22	0,2	0,1
sehr schlechte Verhältnisse				0,1	
extrem schlechte Verhältnisse				0,05	



2 Traktionsmechanik

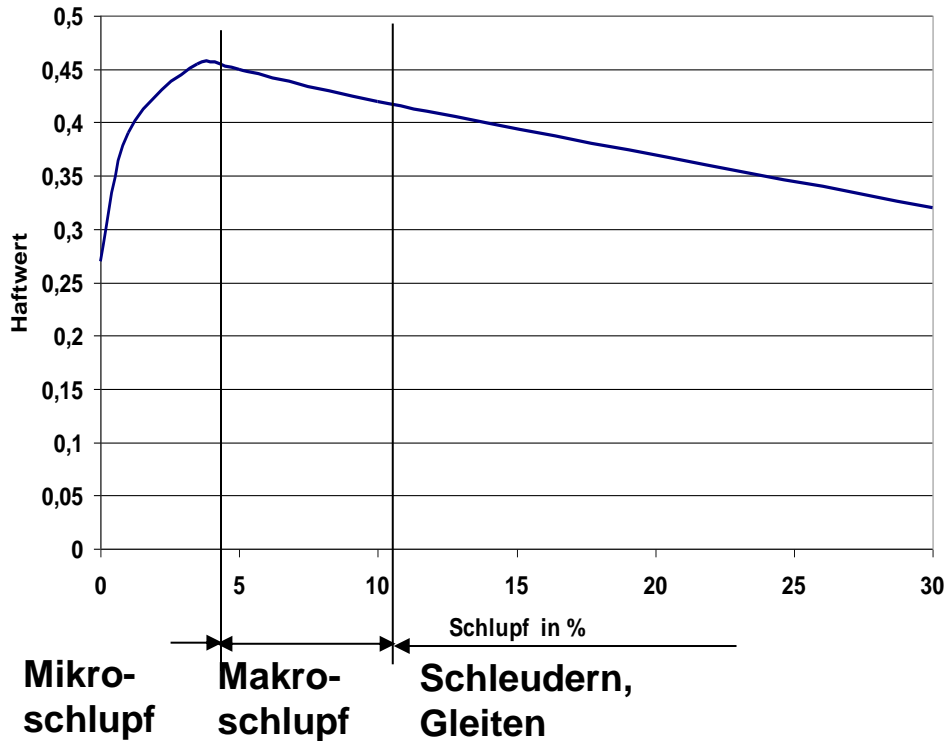


Bild 2.16 Haftwert in Abhängigkeit vom Schlupf

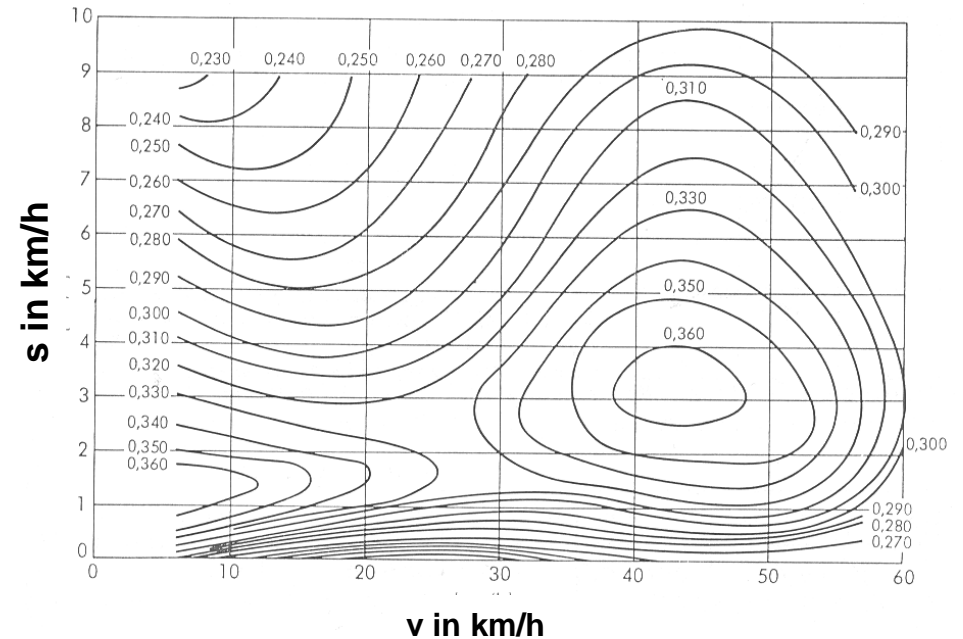


Bild 2.17 Niveaulinien der μ -Werte in Funktion vom Schlupf und Geschwindigkeit (trockene Schiene) [77]

2 Traktionsmechanik

2.6 Z-v-Diagramm, B-v-Diagramm

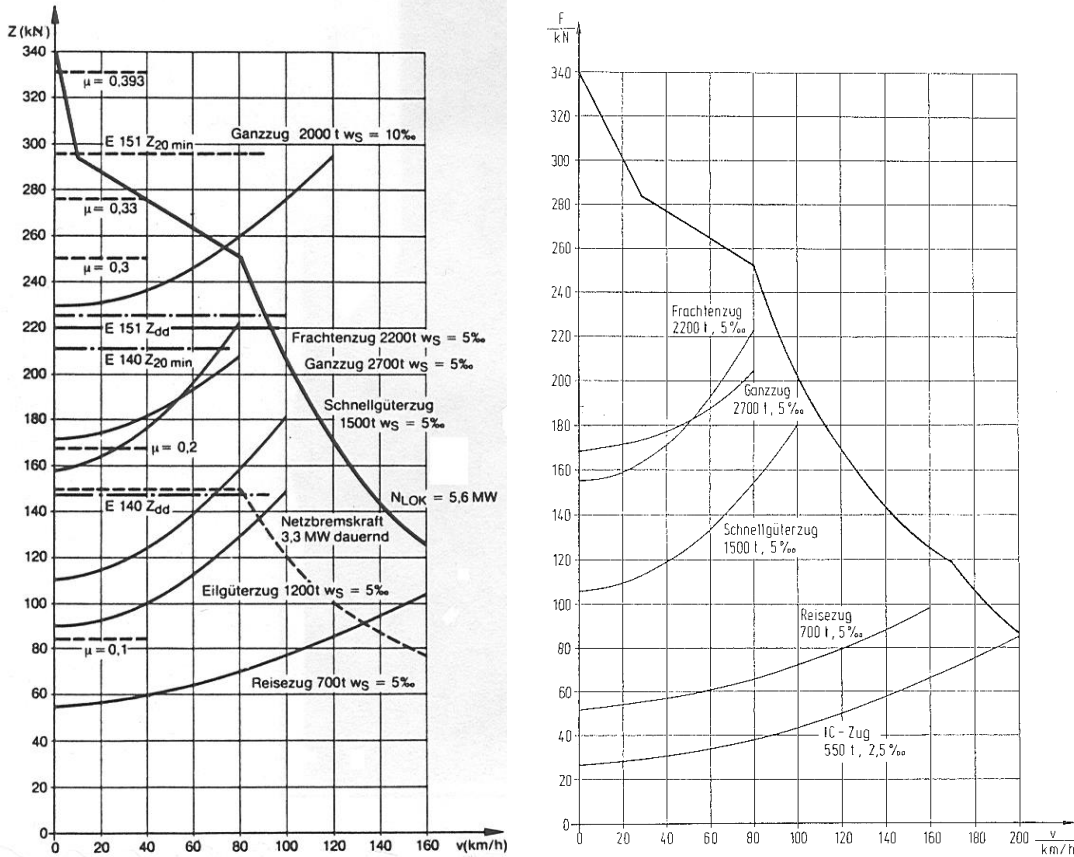


Bild 2.18 Z-v Diagramm [84]

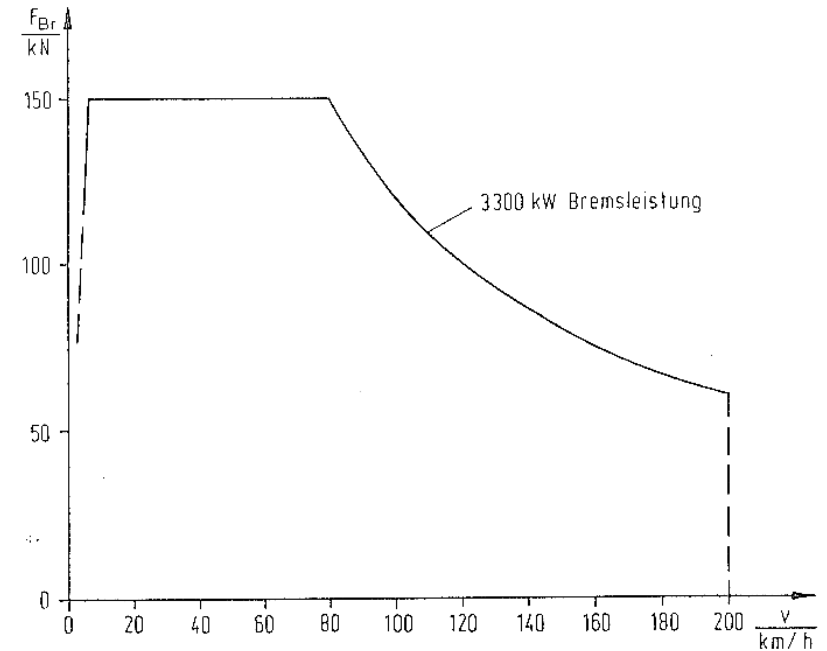


Bild 2.19 B-v Diagramm [84]



2 Traktionsmechanik

2.7 Leistungsauslegung - Energiebedarfsermittlung

typische Leistung/Achse:

Straßenbahn:	60 - 100 kW
U- Bahn:	80 - 150 kW
S-Bahn:	200 - 300 kW
Nebenbahnlokomotive:	500 - 800 kW
Hochleistungslokomotive:	1400 - 1700 kW
Triebzüge alle Achsen angetrieben:	400 - 600 kW

spezifischer Energieverbrauch inkl. Verluste in Fahrleitung und Triebfahrzeug:

Bahnen im Flachland	20 - 30 Wh/tkm
Bahnen im Gebirge	30 - 65 Wh/tkm
Stadtschnellbahn	50 - 75 Wh/tkm
Straßenbahn	40 - 90 Wh/tkm
Trolleybusse	90 - 130 Wh/tkm



2 Traktionsmechanik

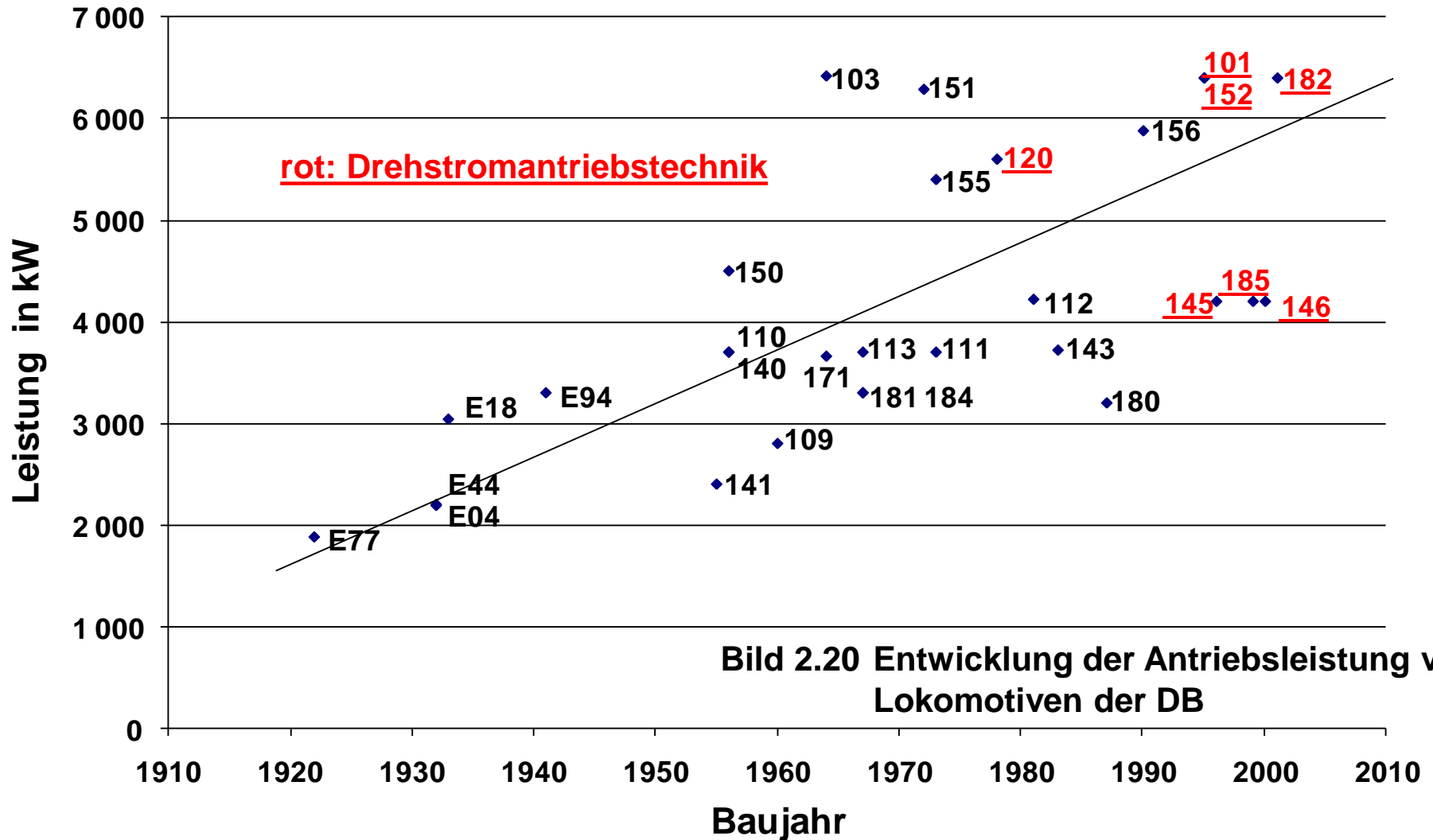
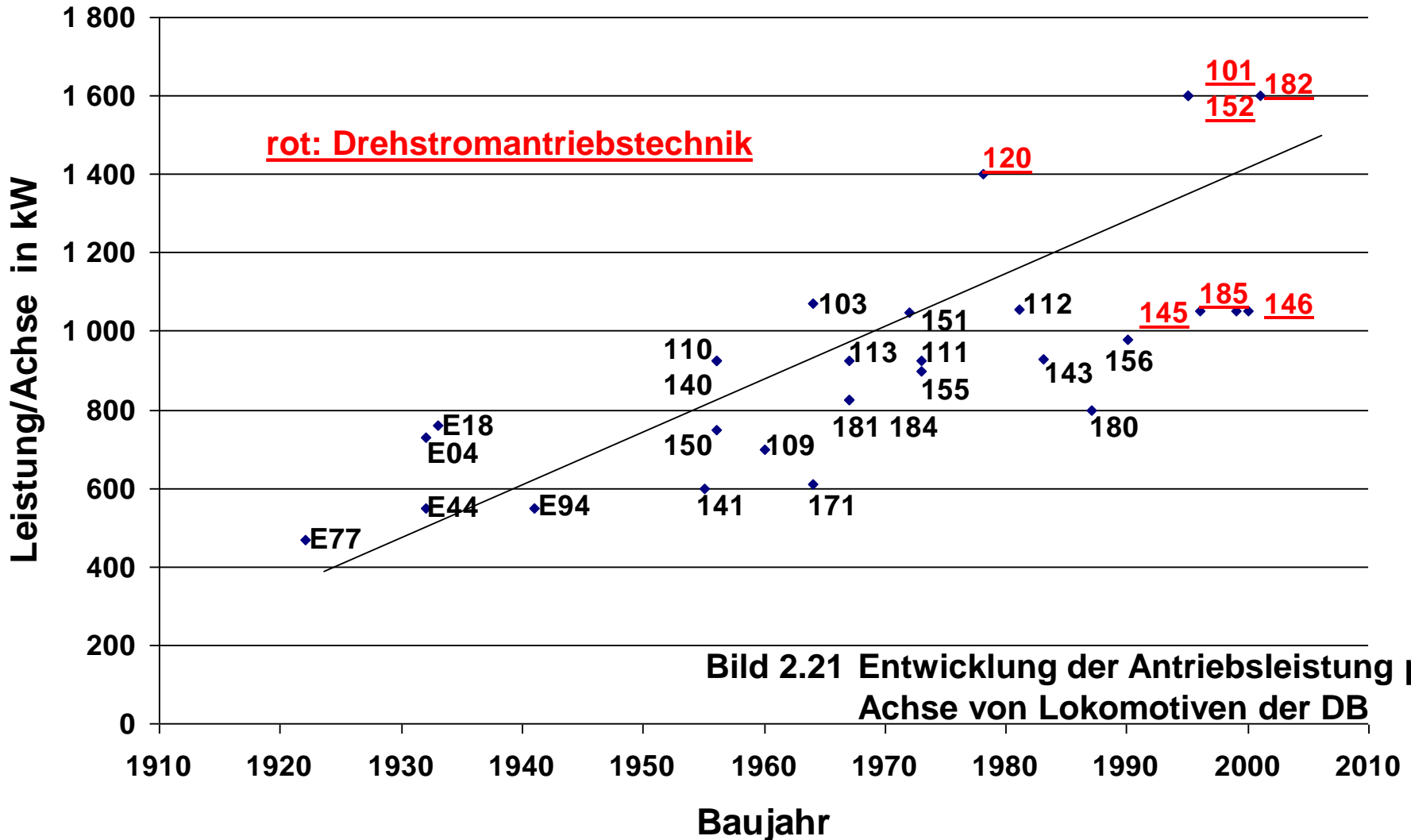


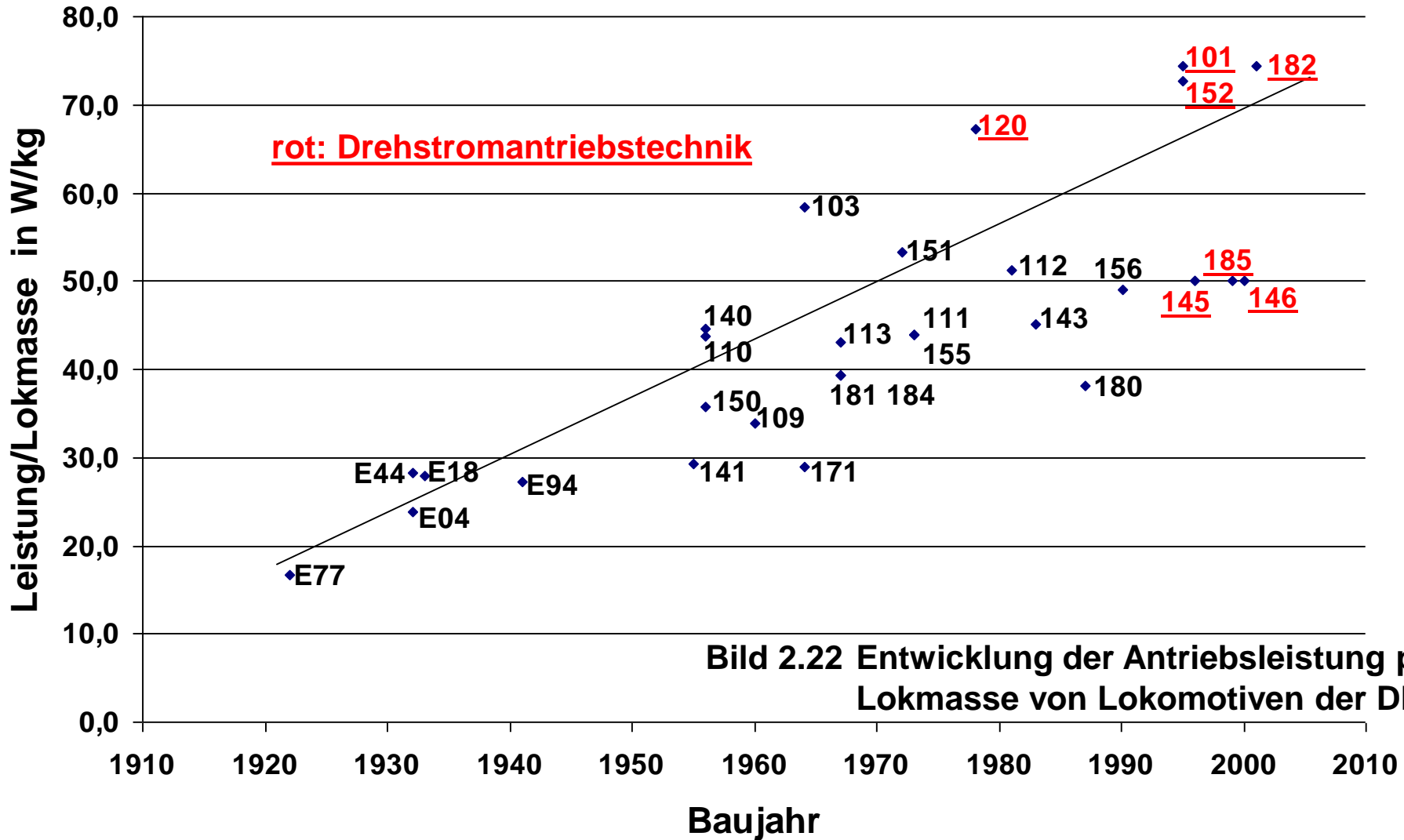
Bild 2.20 Entwicklung der Antriebsleistung von Lokomotiven der DB



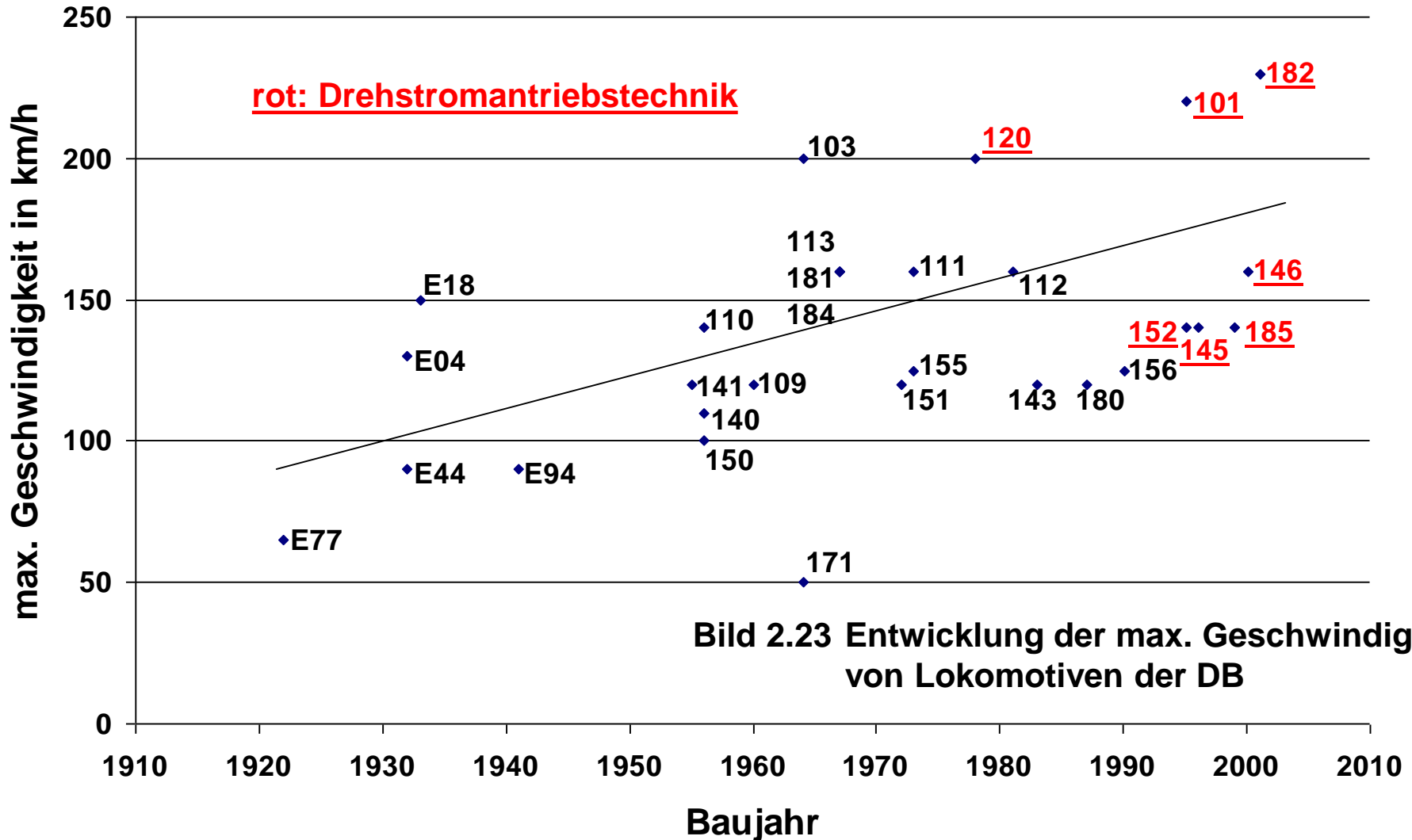
2 Traktionsmechanik



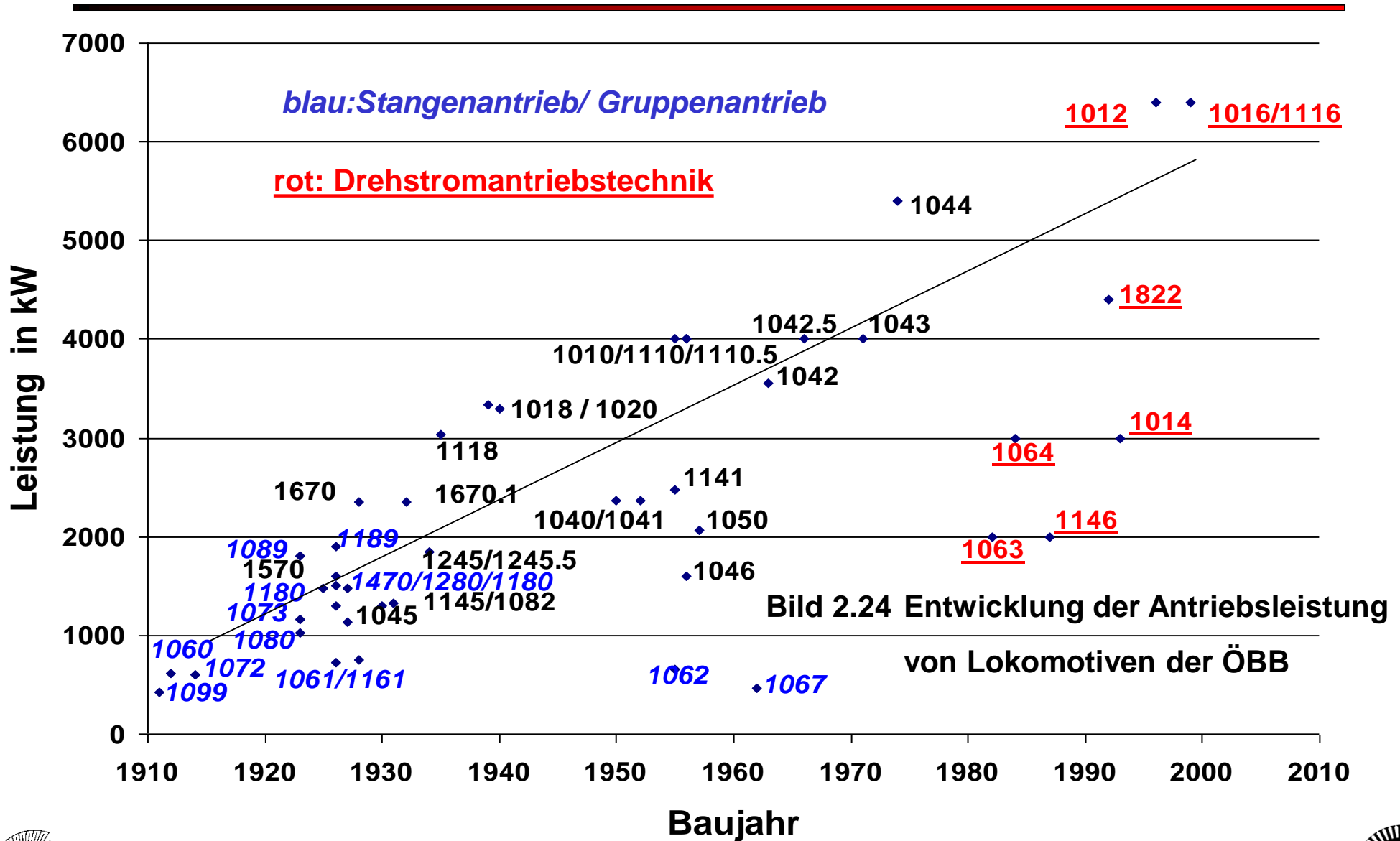
2 Traktionsmechanik



2 Traktionsmechanik



2 Traktionsmechanik



- 3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge**
- 3.1 Bezeichnung der Achsfolge von Triebfahrzeugen
- 3.2 Zugkonzepte - Zugkonfiguration
- 3.3 Wagenkasten - Drehgestell
- 3.4 Antriebskonzepte
- 3.5 Bremskonzepte
- 3.6 Dieselelektrische Konzepte
- 3.7 Beispiel einer modernen Lokomotivfamilie

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.1 Bezeichnung der Achsfolge von Triebfahrzeugen

A	eine Triebachse	1	eine Laufachse
B	zwei Triebachsen	2	zwei Laufachsen
C	drei Triebachsen	+	2 Wagen über Kupplung verbunden
o	einzelan angetrieben	´	Achse nicht im Hauptrahmen gelagert
		()	gemeinsames Drehgestell zweier Wagen
1´C 1´	Triebfahrzeug mit je einer Laufachse vorne und hinten, die nicht im Hauptrahmen gelagert sind und mit drei miteinander verbundenen Triebachsen (Stangenantrieb)		
1´Do 1´	Lokomotive mit je einer Laufachse vorne und hinten, die nicht im Hauptrahmen gelagert sind und vier im Hauptrahmen gelagerte, einzeln angetriebene Achsen		
Bo´Bo´	Triebfahrzeug mit zwei Drehgestellen (nicht im Hauptrahmen gelagert) mit je zwei einzeln angetriebenen Achsen		
B´(2)´B´	zwei Achsen gemeinsam angetrieben, 2 Laufachsen als Jakobsdrehgestell und zwei Achsen gemeinsam angetrieben		



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

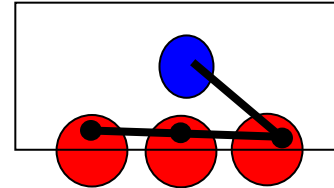
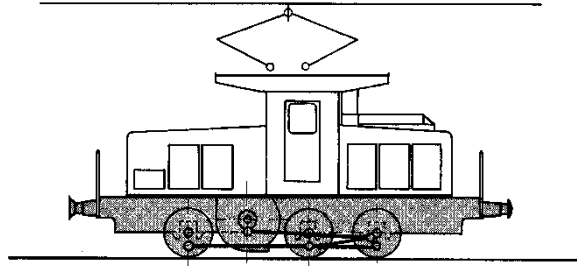


Bild 3.1

C

(z.B. SBB Ee3/3 16351)

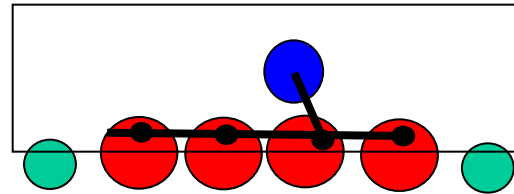
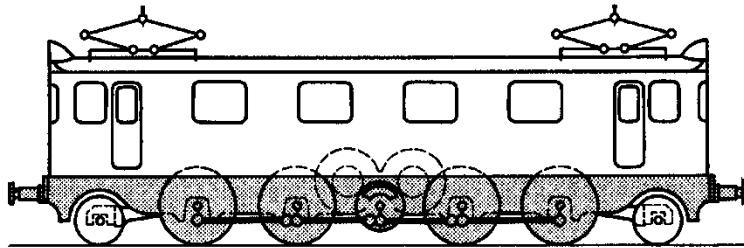


Bild 3.2

1'D 1'

(z.B. SJ Dg2)

Quelle: Internet [47]

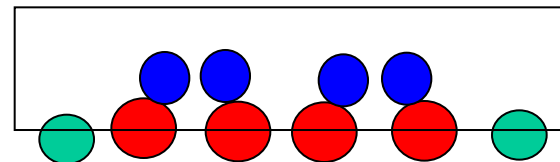


Bild 3.3

1'Do 1'

(z.B. DB BR 119 alt E19)



Laufachse



Triebachse



Fahrmotor



Kuppelstange



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

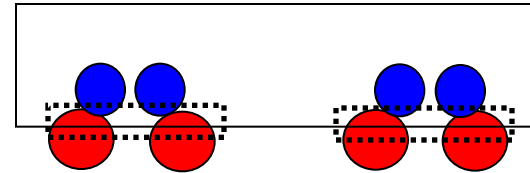
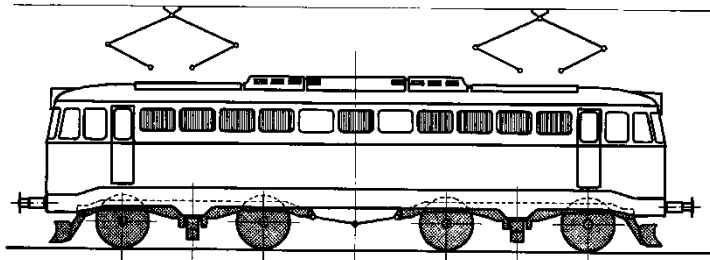


Bild 3.4

Bo'Bo'

(z.B. ÖBB 1042)

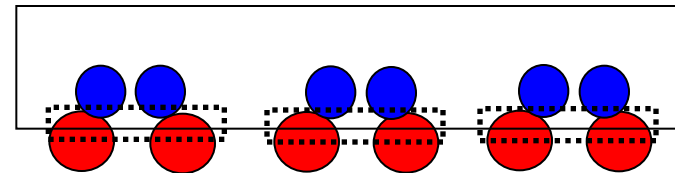
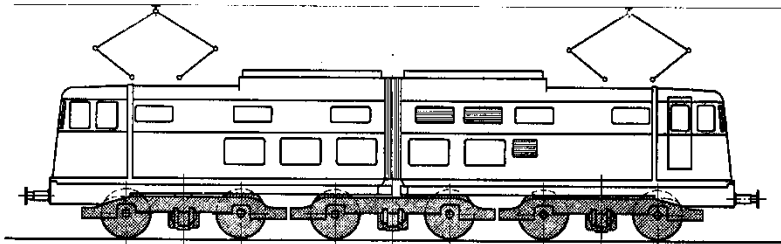


Bild 3.5

Bo'Bo'Bo'

(z.B. FS 646)

Quelle: Internet [47]

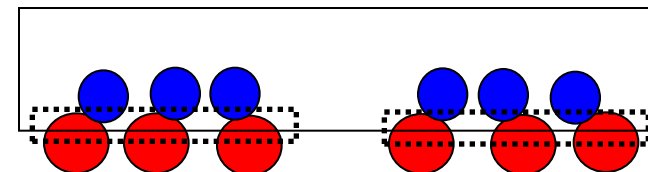
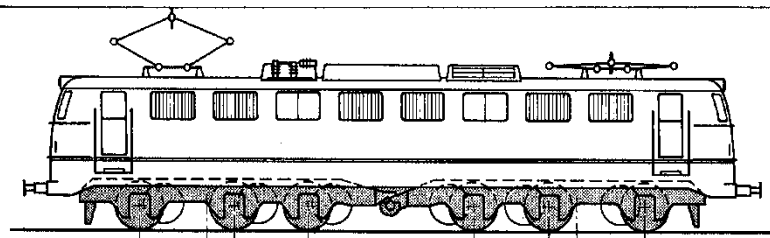


Bild 3.6

Co'Co'

(z.B. DB 150)

● Laufachse ● Triebachse

● Fahrmotor — Kuppelstange



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

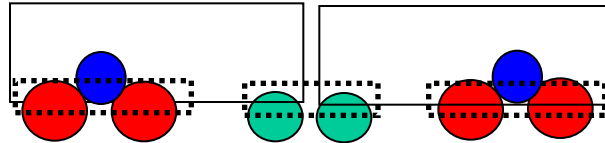


Bild 3.7

$B' (2) B'$

(z.B. BR 642)

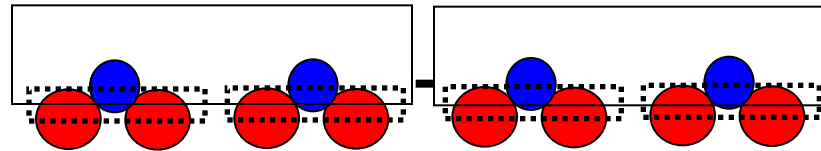


Bild 3.8

$B' B' + B' B'$

(z.B. U-Bahn Wien alt)

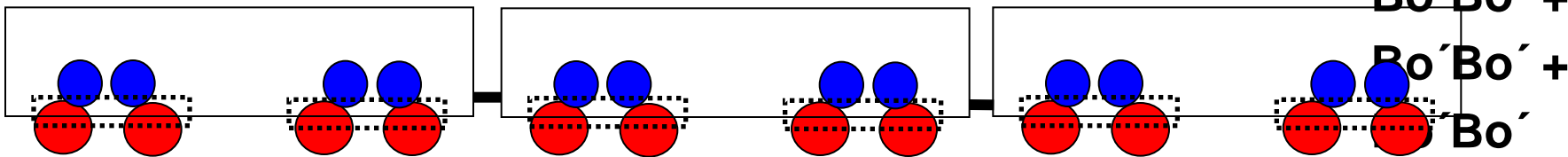


Bild 3.9

$Bo'Bo' +$

$Bo'Bo' +$

Bo'

(z.B. DB 420 S- Bahn)

● Laufachse
 ● Triebachse
 ● Fahrmotor
 — Kuppelstange



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

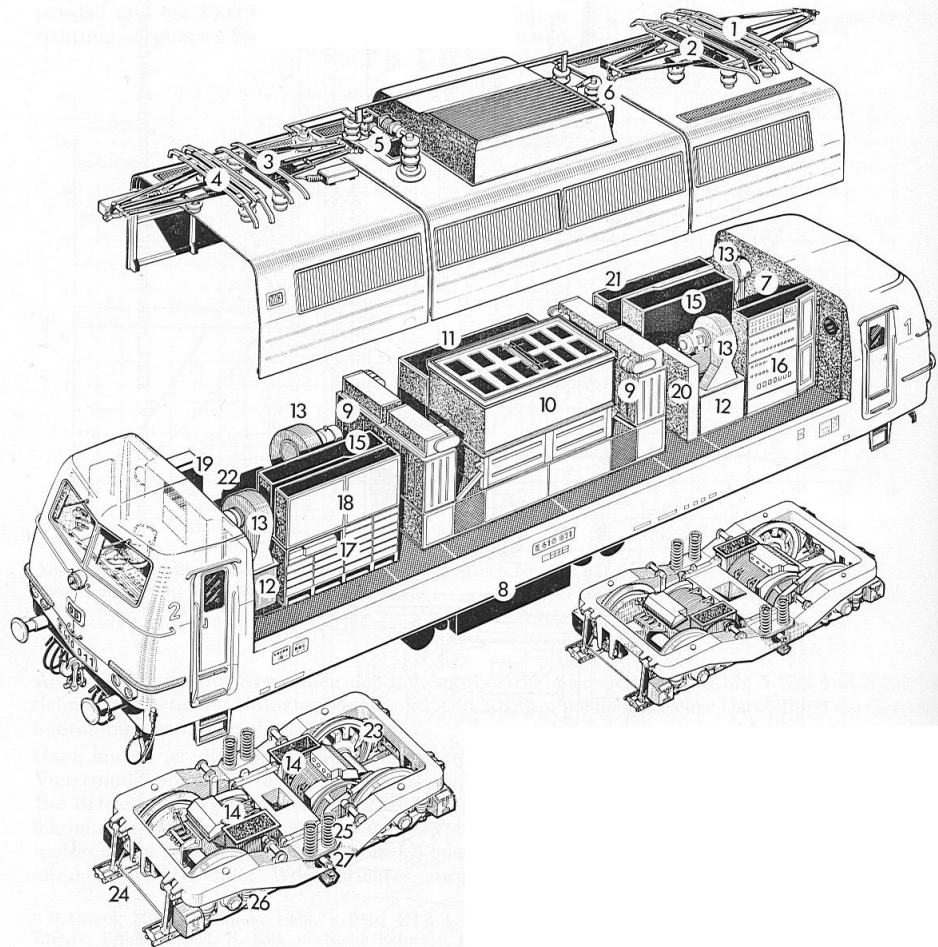
3.2 Zugkonzepte - Zugkonfiguration

Konzept	Beschreibung	Beispiele
Lokomotive Triebkopf Steuerwagen	keine Passagiere Lokomotive im Triebwagendesign Wagen für Passagiere ohne angetriebenen Achsen	DB 101, ÖBB 1016, SBB 460 DB ICE1(401), ÖBB 4010 DB ICE2 (808), ÖBB 6010
Triebwagen	Wagen für Passagiere mit zum Großteil angetriebenen Achsen	DB ICE3, ICE T
S-Bahn	wie Triebwagen Zweirichtungsfahrzeug	DB 420, DB 423, ÖBB 4020
U-Bahn	wie Triebwagen Zweirichtungsfahrzeug	HHA DT4, WVB V,
Straßenbahn	wie Triebwagen Ein- oder Zweirichtungsfahrzeug	CVAG Variobahn, HEAG



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.3 Wagenkasten - Drehgestelle

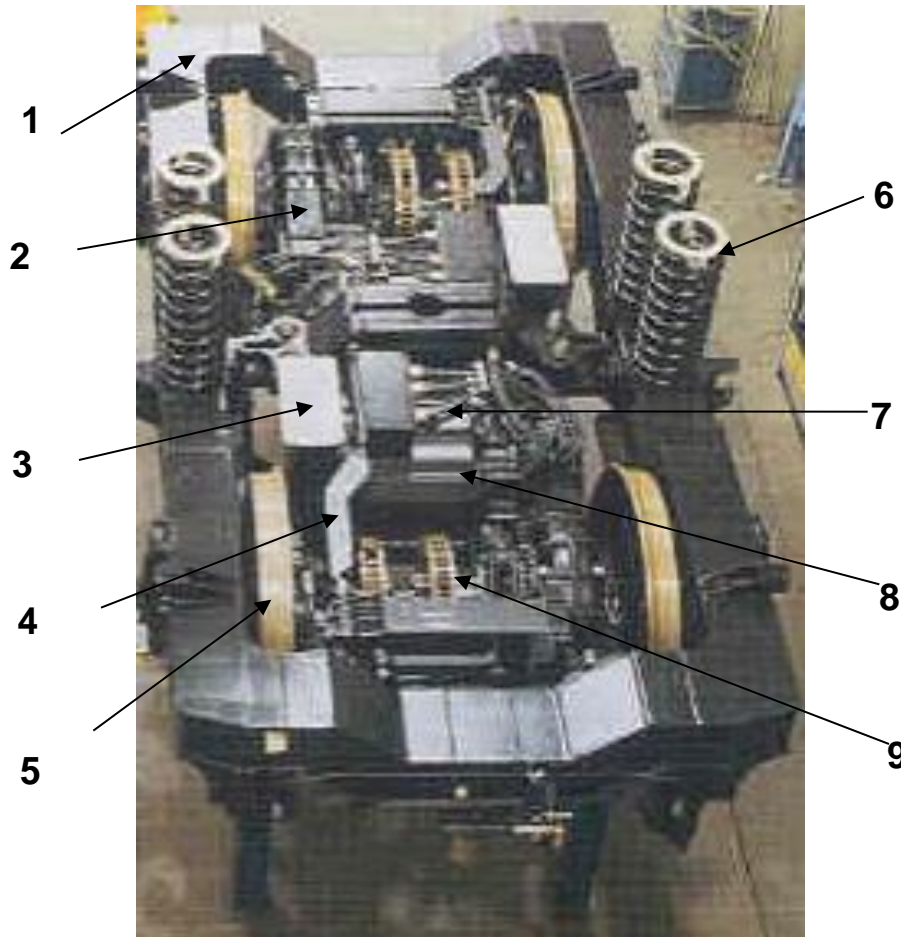


- 1 Stromabnehmer (NS, SNCF)
- 2 Stromabnehmer (DB, ÖBB)
- 3 Stromabnehmer (SNCF)
- 4 Stromabnehmer (NS, SNCF)
- 5 Wechselstromhauptschalter
- 6 Erdungstrennschalter
- 7 Gleichstromhauptschalter
- 8 Haupttransformator
- 9 Traktionsmotorstromrichter
- 10 Anfah- und Bremswiderstand
- 11 Starkstromschaltgeräte
- 12 Traktionsmotorglättungs-drossel
- 13 Traktionsmotorlüfter
- 14 Traktionsmotoren
- 15 Schaltgeräte für Traktionsmotoren
- 16 Apparate für Steuerung
- 17 Elektronik
- 18 Statischer Umformer für Hilfsbetriebe
- 19 Apparate für Hilfsbetriebe
- 20 Automatische Zugsicherung
- 21 Luftgerüst
- 22 Luftkompressor
- 23 Radsatz mit Gummiringkardantrieb
- 24 Bremsgestänge
- 25 Abstützung mit Flexicoilfedern
- 26 Achsfederung (Gummielemente)
- 27 Seitliche Stoßdämpfer

Bild 3.10 Mechanische Aufbau Bo'Bo'
Vierstrom- Lokomotive DB BR 184 [47]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



Primärfederung:

Federelemente zwischen Radsatz und Drehgestell

Sekundärfederung:

Federelemente zwischen Drehgestell und Wagenkasten

- 1 Drehgestellrahmen
- 2 Getriebe
- 3 Lufteintritt für Fahrmotoren
- 4 Tragarm der Motoraufhängung
- 5 Radscheibe
- 6 Sekundärfederung
- 7 Anschlußleitungen für Fahrmotor
- 8 Fahrmotor
- 9 Bremsscheibe

Bild 3.11 Drehgestell der DB - Hochleistungslokomotive BR 101 [3]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

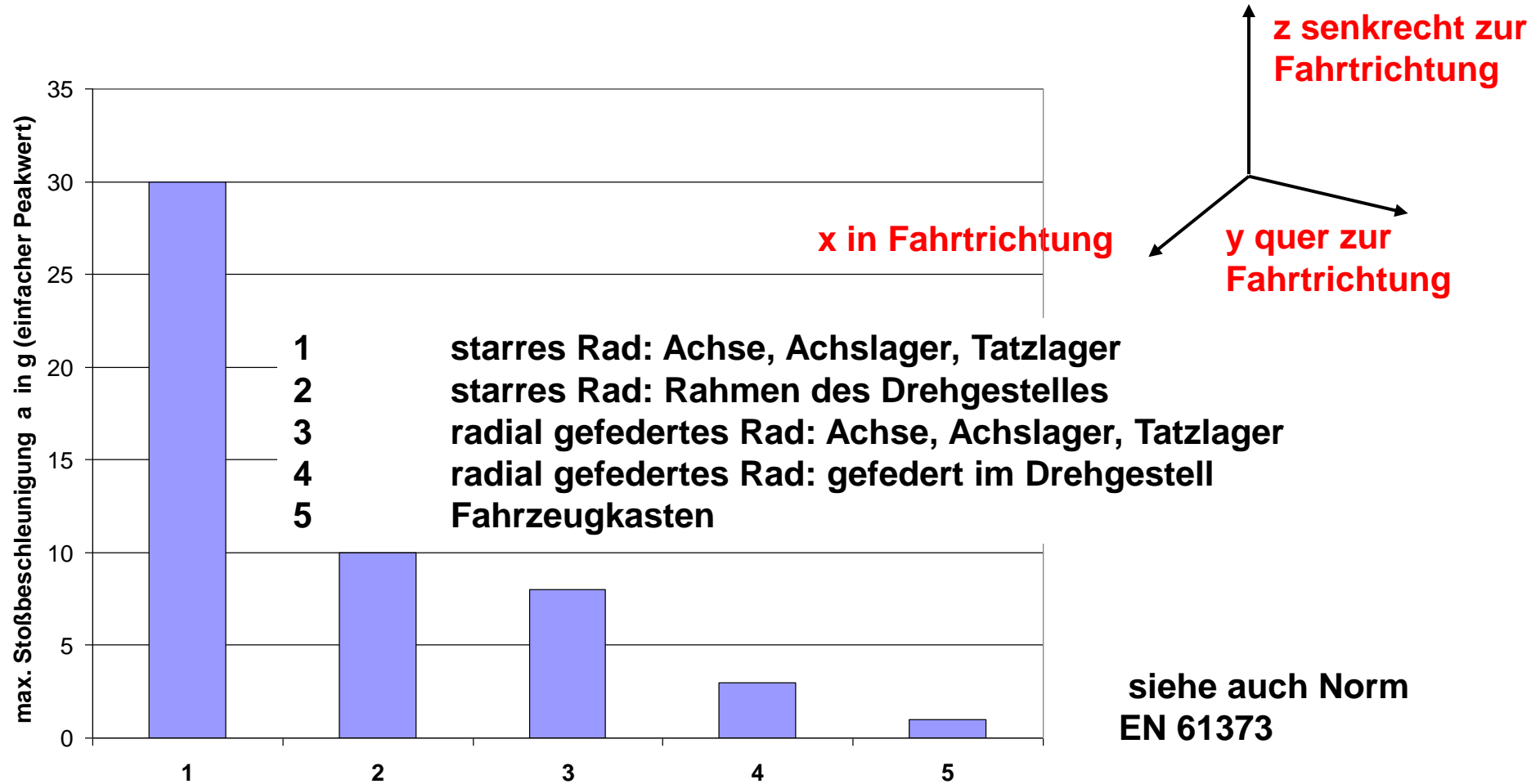
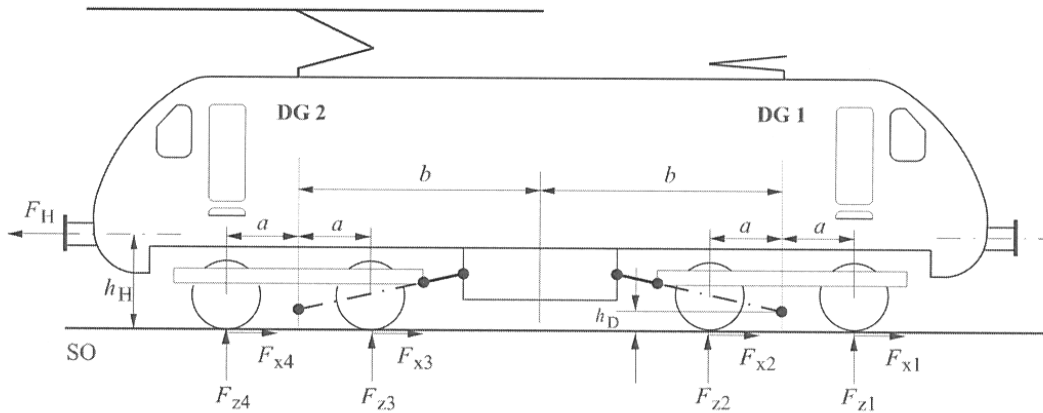


Bild 3.12 Max. Stoßbeschleunigungen von Triebfahrzeugteilen bis zu einer Geschwindigkeit von 120 km/h [3]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 2.a Radsatzabstand
- 2.b Drehgestellmittenabstand
- h_D Zugkraftanlenkung im DG über SO
- h_H Höhe des Zughakens über SO
- F_h Zughakenkraft
- $F_{z1} - F_{z4}$ Aufstandskraft vom Radsatz 1 - 4

Bild 3.13 Radsatzentlastung bei einem vierachsigen Triebfahrzeug [81]

- Lokgewichtskraft $G_{Lok} = F_{DG1} + F_{DG2}$
- Annahme $F_{x1} = F_{x2} = F_{x3} = F_{x4} = F_{xi} = F_H / 4$
- Kastenmoment $M_K = F_H \cdot (h_H - h_D) = (F_{zDG2} - F_{zDG1}) \cdot b$
- Drehgestellmomente $M_{Gdi} = \frac{1}{2} F_H h_D = 2 \cdot F_{xi} \cdot h_D \cdot (F_{z2} - F_{z1}) \cdot a = (F_{z4} - F_{z3}) \cdot a$

Beispiel: SBB 460 $G_{lok} = 805 \text{ kN}$, $F_h = 275 \text{ kN}$
 $a = 1,4 \text{ m}$, $b = 5,5 \text{ m}$, $h_H = 1,03 \text{ m}$ $h_D = 0,25 \text{ m}$

$F_{zDG1} = 382,5 \text{ kN}$	$F_{z1} = 179,2 \text{ kN}$	22,3%
	$F_{z2} = 203,8 \text{ kN}$	25,3%
$F_{zDG2} = 422,5 \text{ kN}$	$F_{z3} = 198,7 \text{ kN}$	24,7%
	$F_{z4} = 223,3 \text{ kN}$	27,7%
$\Sigma F_{zDG} = 805 \text{ kN}$	$\Sigma F_z = 805 \text{ kN}$	$\Sigma = 100\%$

$$F_{zDG1} = \frac{1}{2} \left[G_{Lok} - F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} \right) \right]$$

$$F_{zDG2} = \frac{1}{2} \left[G_{Lok} + F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} \right) \right]$$

$$F_{z1} = \frac{1}{4} \left[G_{Lok} - F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} + \frac{h_D}{a} \right) \right]$$

$$F_{z2} = \frac{1}{4} \left[G_{Lok} - F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} - \frac{h_D}{a} \right) \right]$$

$$F_{z3} = \frac{1}{4} \left[G_{Lok} + F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} - \frac{h_D}{a} \right) \right]$$

$$F_{z4} = \frac{1}{4} \left[G_{Lok} + F_H \left(\frac{h_H - h_D}{b} + \frac{h_D}{a} \right) \right]$$



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.4 Antriebskonzepte

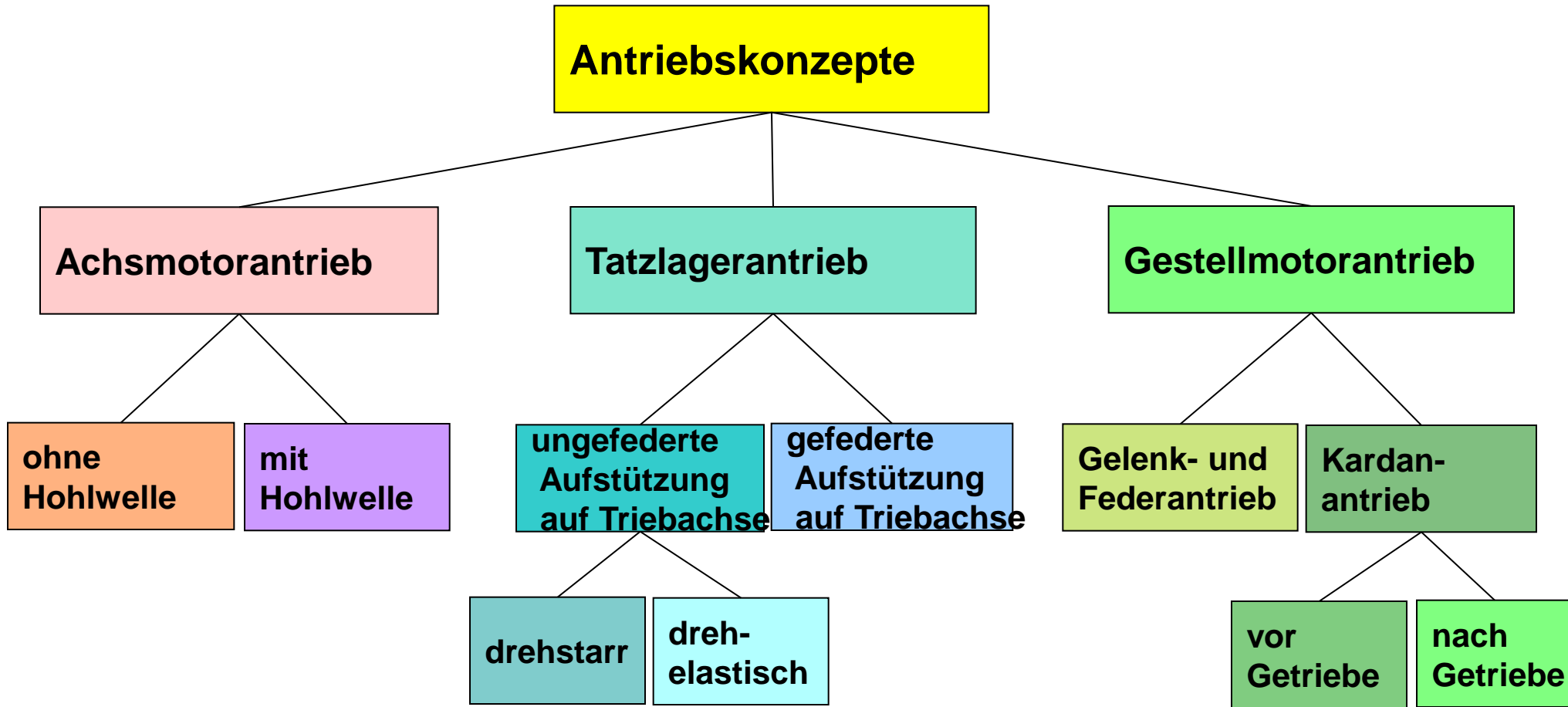


Bild 3.14 Einteilung der Antriebskonzepte



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.4.1 Achsmotorantrieb

Vorteile: kein Getriebe

Nachteil: unabgefederte Masse 100% vom Antrieb

hohes Drehmoment erforderlich,
geringe Motordrehzahl

- a Achsmotorantrieb mit Hohlwelle
- b Achsmotorantrieb ohne Hohlwelle
- 1 Ständer
- 2 Läufer
- 3 Treibrad
- 4 Hohlwelle
- 5 Gummielemente oder Gelenke
- 6 Mitnehmerzapfen
- 7 Lagerung des Motors auf Achse oder Hohlwelle

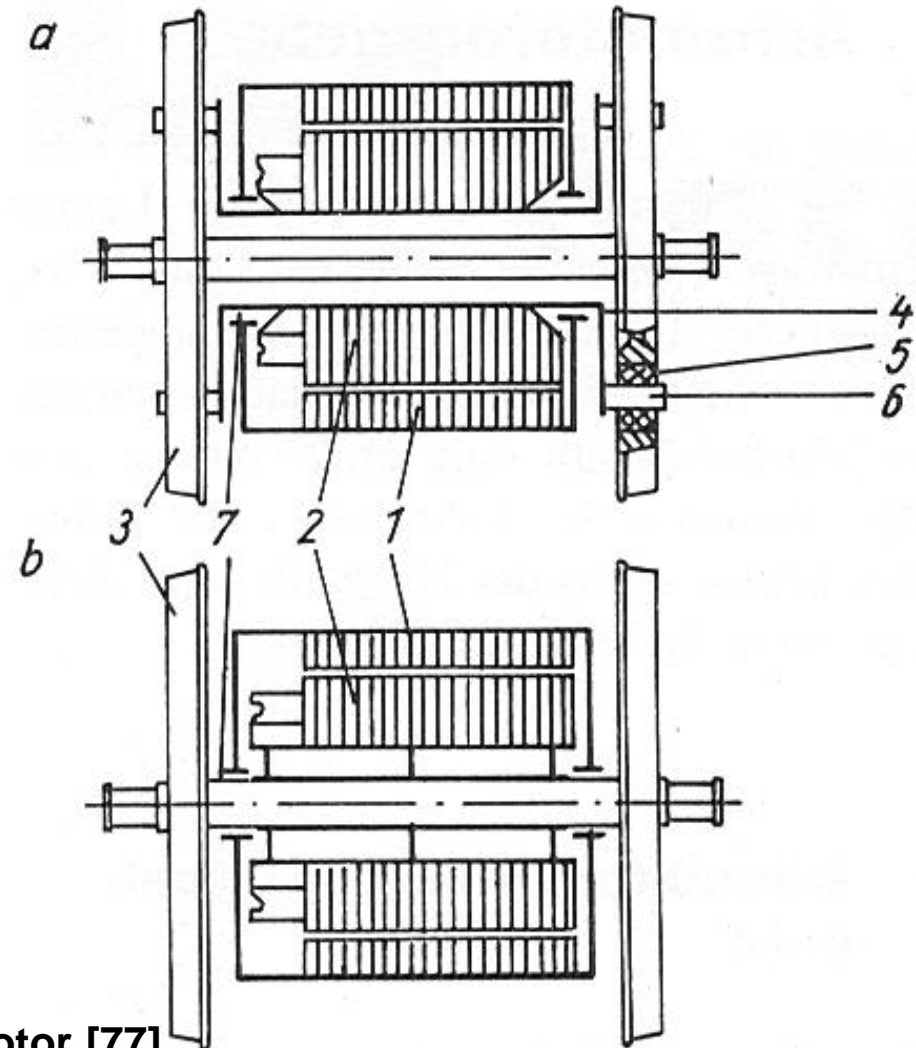


Bild 3.15 Antrieb durch Achsmotor [77]

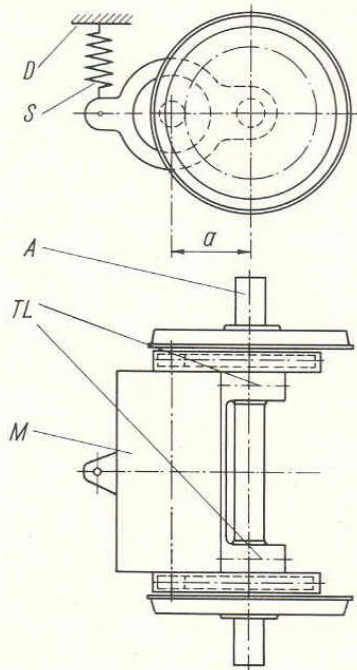
3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.4.2 Tatzlagerantrieb

v_{\max} : 120 - 140 km/h (USA: 160 - 180 km/h)

Vorteile: einfacher Aufbau, kostengünstig

Nachteil: unabgefederte Masse ca. 50 % vom Antrieb



- A Triebachswelle
- D Aufhängung im DG
- M Fahrmotor
- S Drehmomentenstütze
- TL Tatzlager
- a Zentralabstand

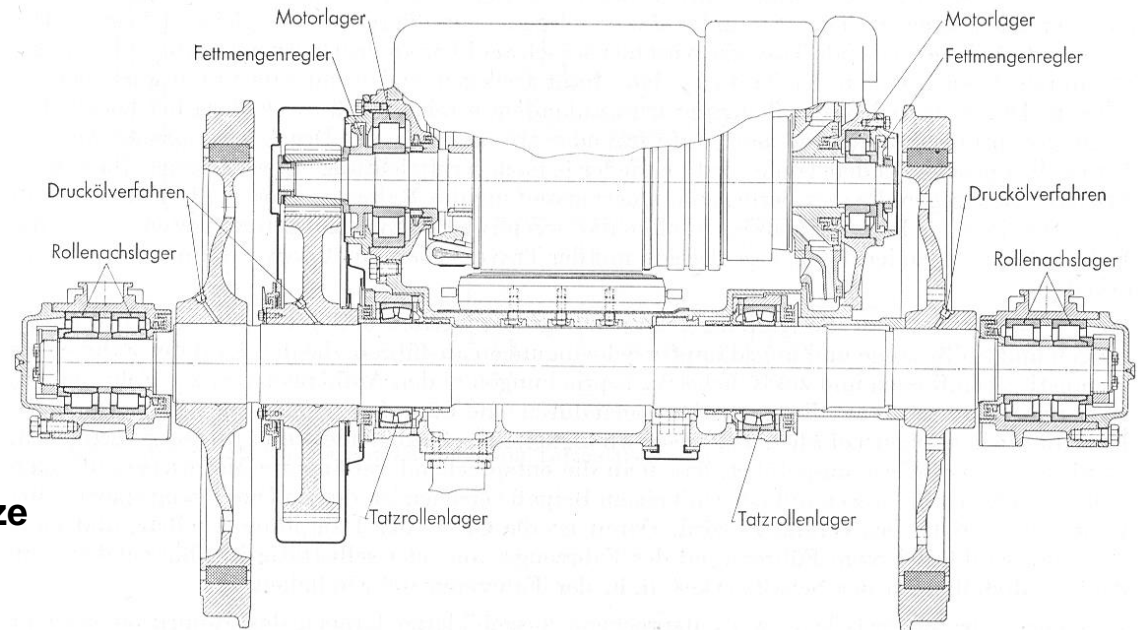
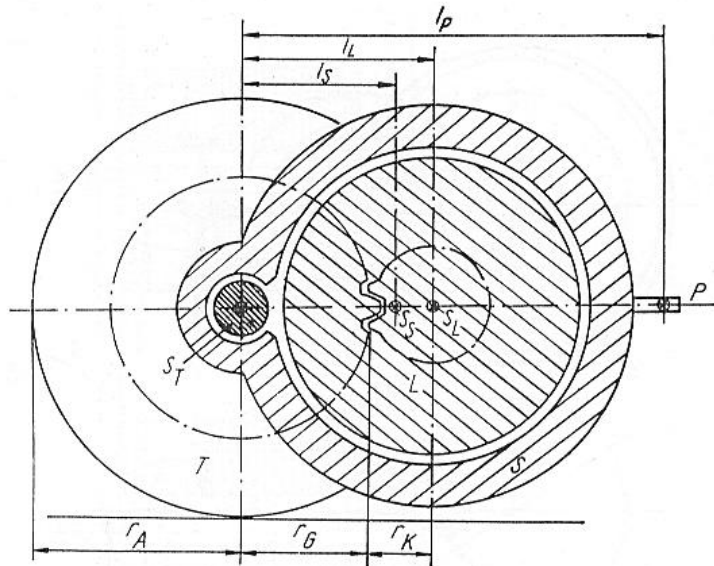


Bild 3.17 Tatzlagermotor für einen Straßenbahntriebwagen [77]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



$$I_P = \frac{m_S I_S^2 + m_L I_L^2 + I_L (1 + \ddot{u}) \frac{I_L}{r_L} + I_S}{m_S I_S + m_L I_L}$$

$$F_T = \ddot{x}_T \frac{m_L (I_P - I_L) + m_S (I_P - I_S) - I_L \frac{1 + \ddot{u}}{r_L}}{I_P}$$

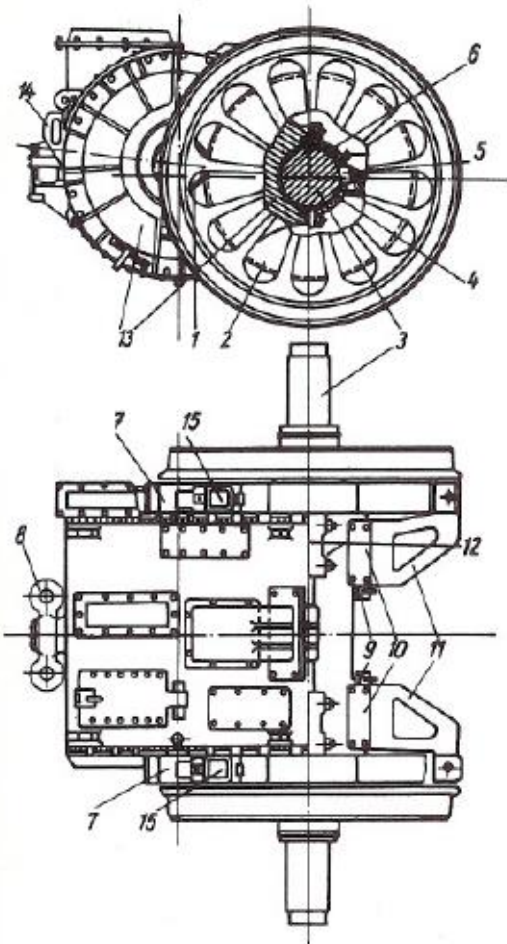
$$F_Z = x_T \frac{I_L \frac{1 + \ddot{u}}{r_L}}{I_P}$$

$$m_{M,dyn} = \frac{m_L (I_P - I_L) + m_S (I_P - I_S)}{I_P}$$

Bild 3.18 Prinzipschema des Tatzlagerantriebs [77]

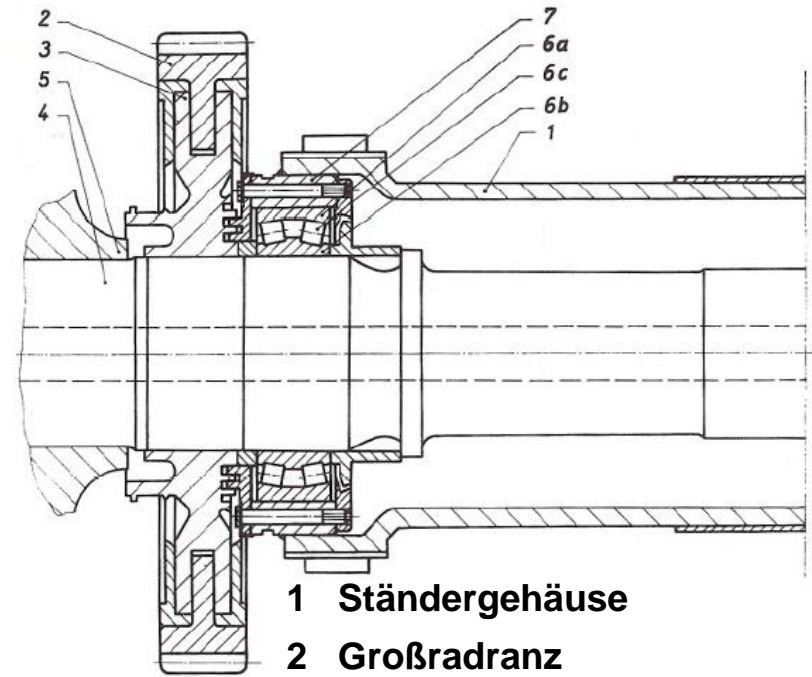
- | | | | |
|------------|--|----|---------------------------|
| I_L | Trägheitsmoment des Läufers um seinen Schwerpunkt | L | Läufer |
| I_S | Trägheitsmoment des Ständers um seinen Schwerpunkt | P | Drehpol |
| m_L | Masse des Läufers | S | Ständer |
| m_S | Masse des Ständers | Sx | Schwerpunkt des Bauteiles |
| m_T | Masse des Treibradsatzes | T | Treibradsatz |
| \ddot{u} | Übersetzungsverhältnis des Getriebes | | |

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Ritzel
- 2 Großrad
- 3 Triebachswelle
- 4 Tatzlagerdeckel
- 5 Schmierpolster
- 6 Tatzlagerschalen
- 7 Zahnradschutzkasten
- 8 Konsole zur Motorabstützung
- 9 Schmiergefäß
- 10 Deckel des Ölgefäß
- 11 Tragarm für Radschutzkasten
- 12 Tatzlagerdeckel
- 13 Fahrmotor
- 14 Notaufhängekonsole
- 15 Nachfüllöffnung der Schmierstoffe

Bild 3.19 Tatzlagerantrieb der BR E44 [77]



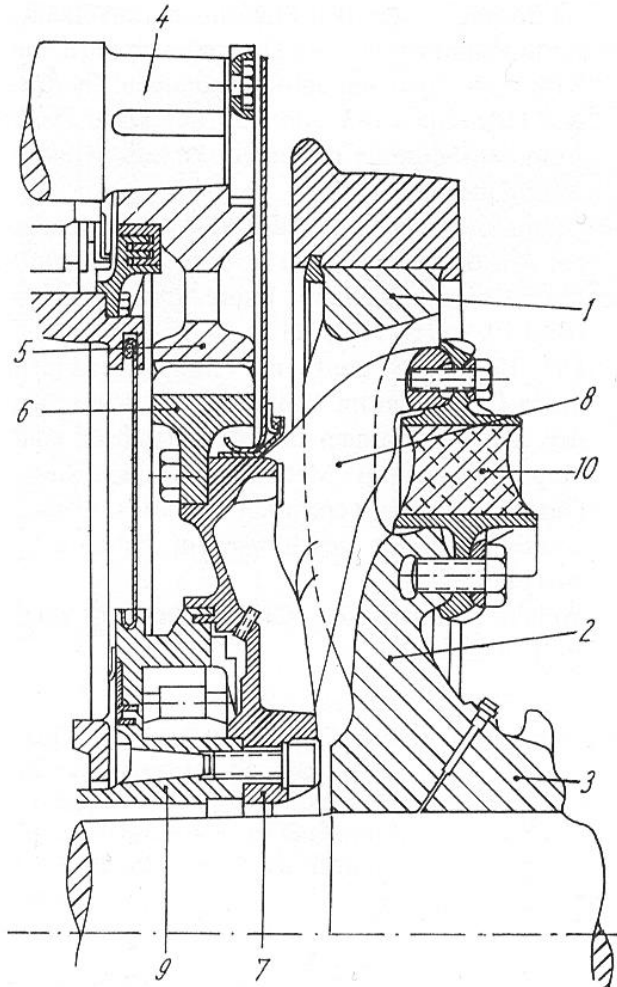
- 1 Ständergehäuse
- 2 Großradranz
- 3 Großradkörper
- 4 Triebachswelle
- 5 Treibradnabe
- 6 Pendelrollenlager (a,b,c)
- 7 Lagergehäuse

Bild 3.20 Tatzrollenantrieb eines Triebzuges

Ausführung mit gefedertem Großrad [77]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.4.3 Gestellmotorantrieb

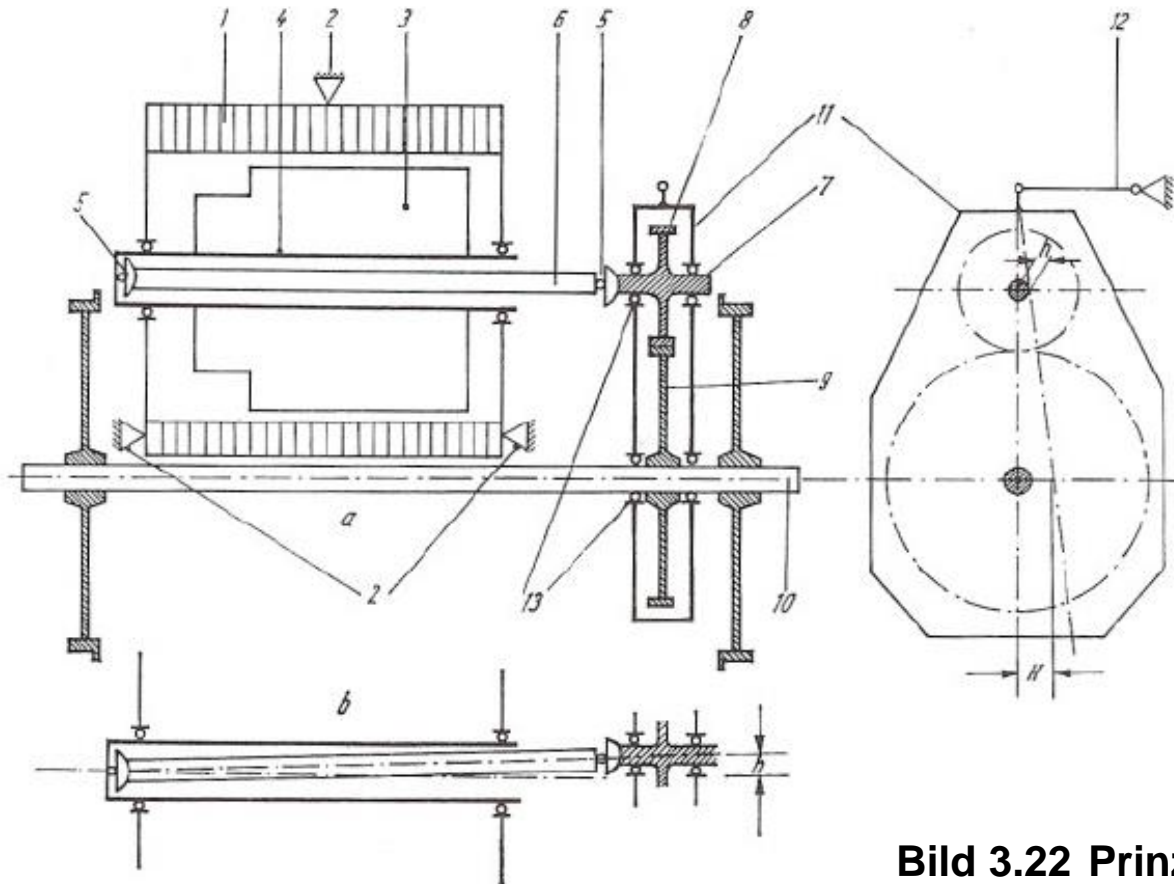


- 1 Triebradfelge
- 2 Triebradkörper
- 3 Triebradnabe
- 4 Motorwelle
- 5 Ritzel
- 6 Großradkranz
- 7 Großradkörper
- 8 Auslegearm am Großradkörper
- 9 Hohlwelle
- 10 Gummisegment

Bild 3.21 Siemens- Gummiringfederantrieb [77]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

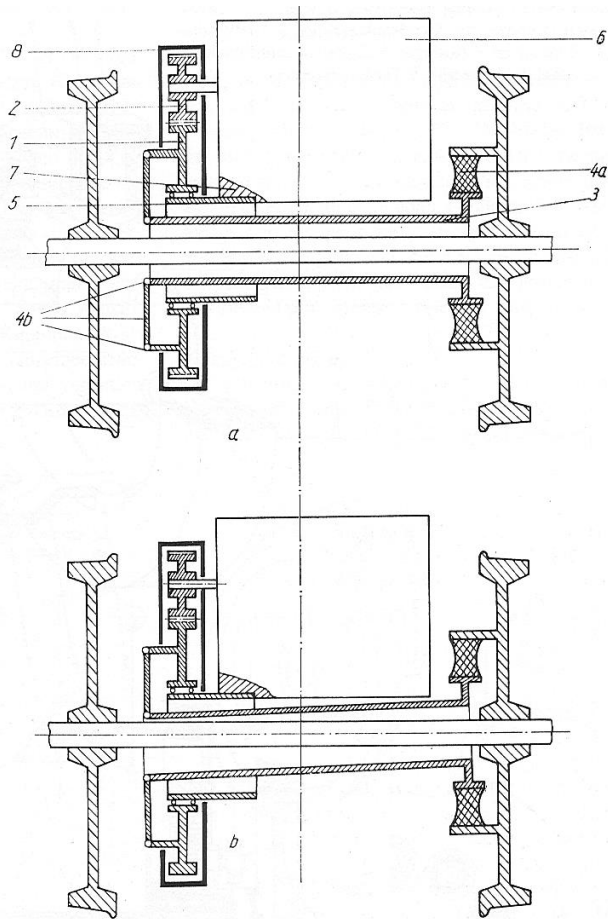


- 1 Ständer
- 2 Abstützung des Ständers im DG
- 3 Läufer
- 4 Läuferhohlwelle
- 5 Gelenkkupplung
- 6 Gelenkwelle
- 7 Ritzelwelle
- 8 Ritzel
- 9 Großrad
- 10 Treibachswelle
- 11 Getriebegehäuse
- 12 Drehmomentenstütze
- 13 Lagerstellen

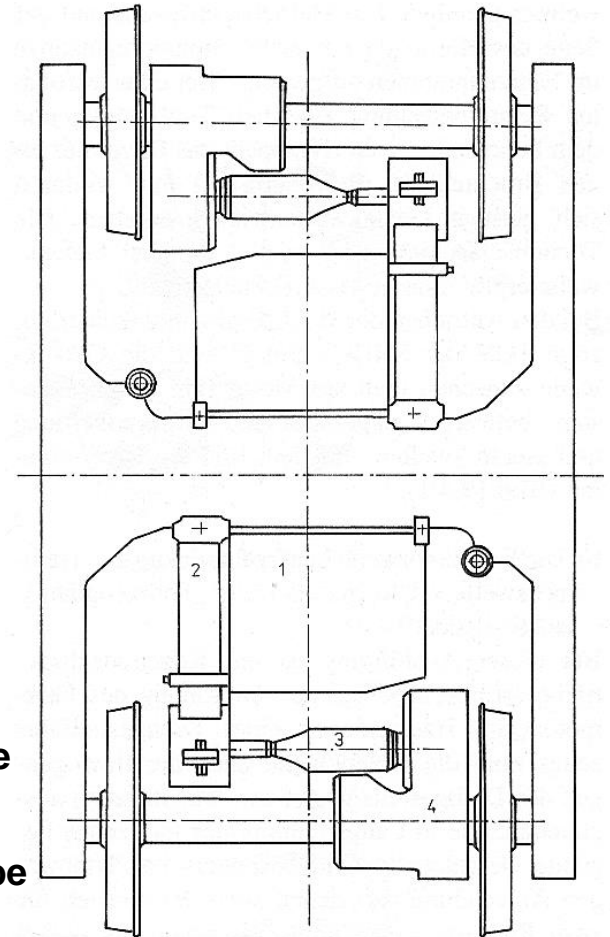
Bild 3.22 Prinzip des Kardantriebes [77]

Kardanwelle vor Getriebe

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- a Mittelstellung
- b Triebachse gegenüber Motor ausgelenkt
- 1 Großrad
- 2 Ritzel
- 3 Kardanwelle
- 4 Kardankupplung
- 5 Achse für Großradlagerung
- 6 Fahrmotor
- 7 Ständer
- 8 Getriebekasten



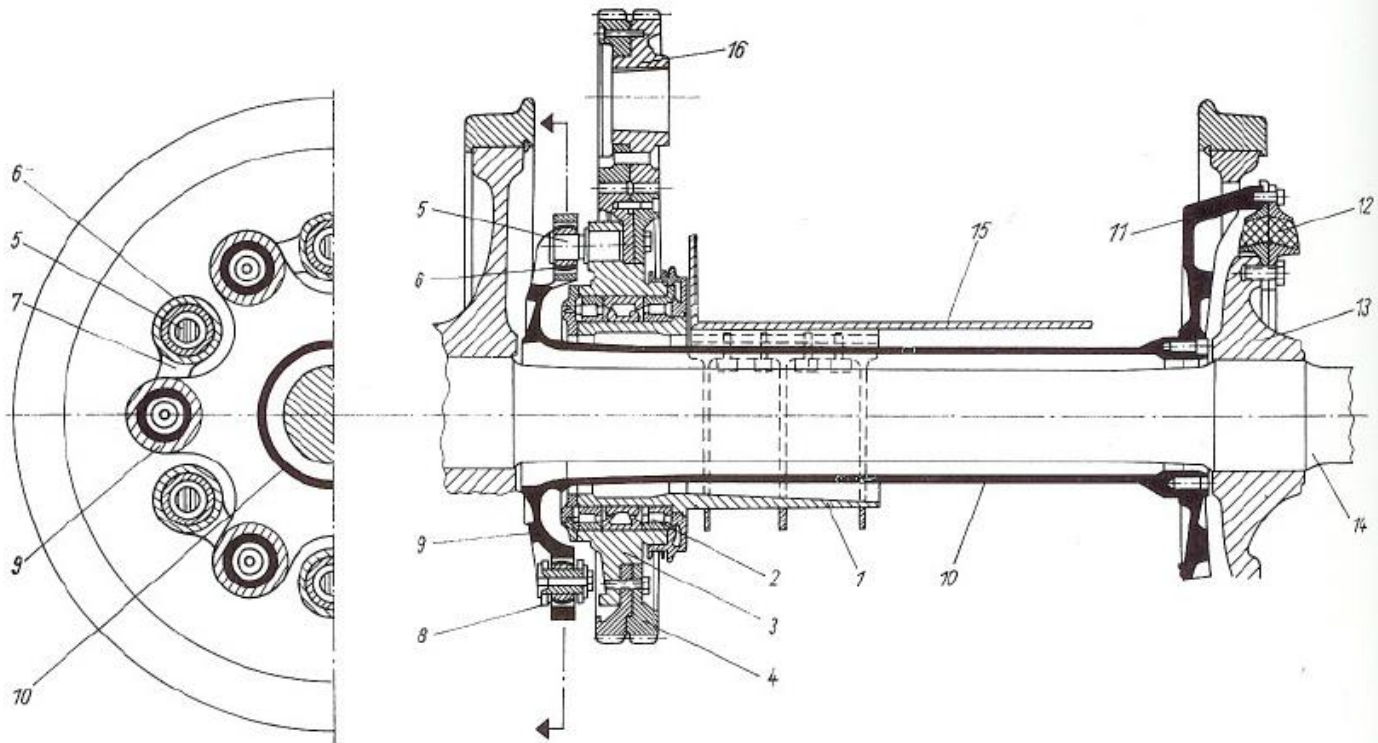
- 1 Fahrmotor
- 2 Stirnradgetriebe
- 3 Kardanwelle
- 4 Kegelradgetriebe

Bild 3.23 Prinzipdarstellung des Gelenkwellenantriebes mit Gelenkwelle nach Getriebe [77]

Bild 3.24 Kardanwellenantrieb des TGV Kardanwelle zwischen Getrieben



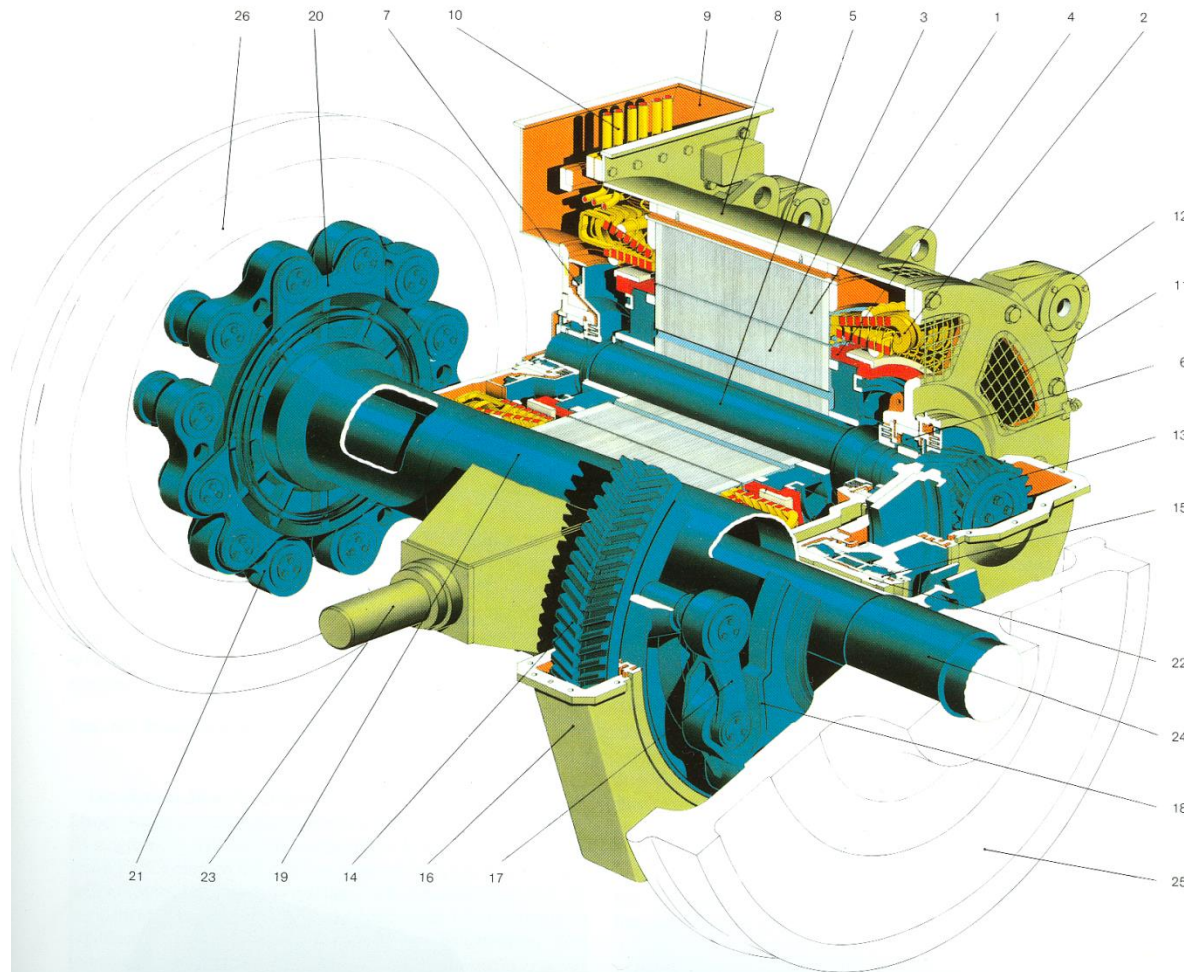
3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Hohlwellenachsstummel
- 2 Großradlager
- 3 Großradkörper
- 4 Großrad
- 5 Zapfen am Großrad
- 6 sphärischer Silentblock
- 7 Lenker
- 8 sphärischer Silentblock
- 9 Hohlwellenflansch
- 10 Hohlwelle (Gelenkwelle)
- 11 Ausleger an Hohlwelle
- 12 Gummiringsegment
- 13 Treibradkörper
- 14 Treibachswelle
- 15 Ständergehäuse
- 16 Ritzel

Bild 3.25 Gummi-Gelenk-Kardantrieb der BBC [77]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

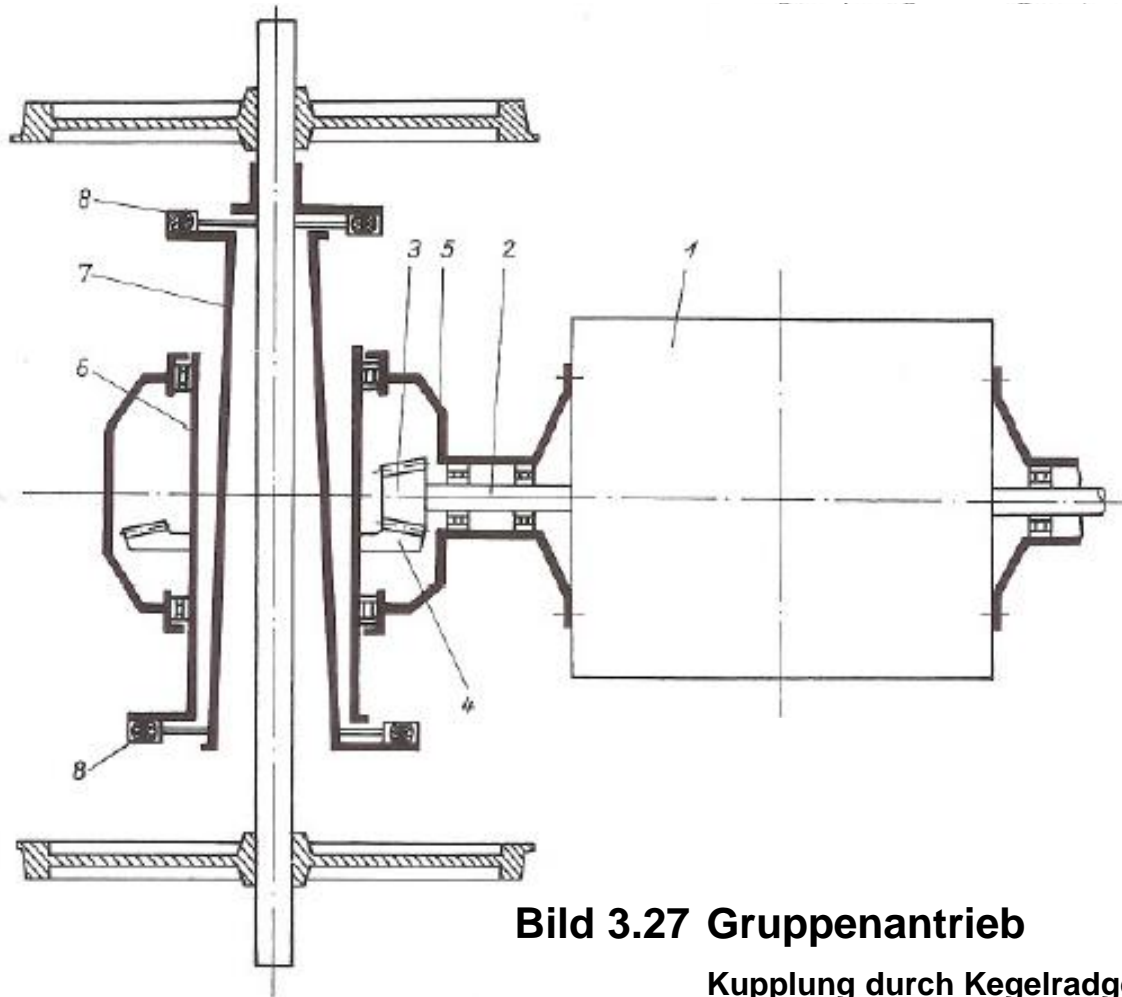


- 1 Ständerblechpaket
- 2 Ständerwicklung
- 3 Läuferblechpaket
- 4 Kurzschlußwicklung
- 5 Welle
- 6 Zylinderrollenlager
- 7 Impulzzahnscheibe
- 8 Gehäuse
- 9 Lufteintrittsöffnung
- 10 Anschlußkabel
- 11 Luftaustrittsöffnungen
- 12 Befestigungsaugen
- 13 Ritzel
- 14 Großrad
- 15 Großradlager
- 16 Radschutzkasten
- 17 Gelenkhebelkupplung
- 18 Hohlwellenstern
- 19 Hohlwelle
- 20 Gabelstern
- 21 Gelenkhebelkupplung
- 22 Hohlwellengehäuse
- 23 Tragarm
- 24 Radsatzwelle
- 25 Scheibenrad
- 26 Scheibenrad mit Antriebsbolzen

Bild 3.26 Fahrmotor, Getriebe und Antrieb mit Radsatz DB BR120 [3]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Motor
- 2 Motorwelle
- 3 Kegelradritzel
- 4 Großkegelrad
- 5 Getirbegehäuse
- 6 Großradhohlwelle
- 7 Kardanhohlwelle
- 8 Kardankupplung

Vorteil: einfacher Aufbau

Nachteil: mechanische Verspannungen
im Antriebsstrang bei
unterschiedlichen
Radreifendurchmesser
größerer Reifenverschleiß
mechanische Blindleistung

Bild 3.27 Gruppenantrieb

Kupplung durch Kegelradgetriebe [77]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

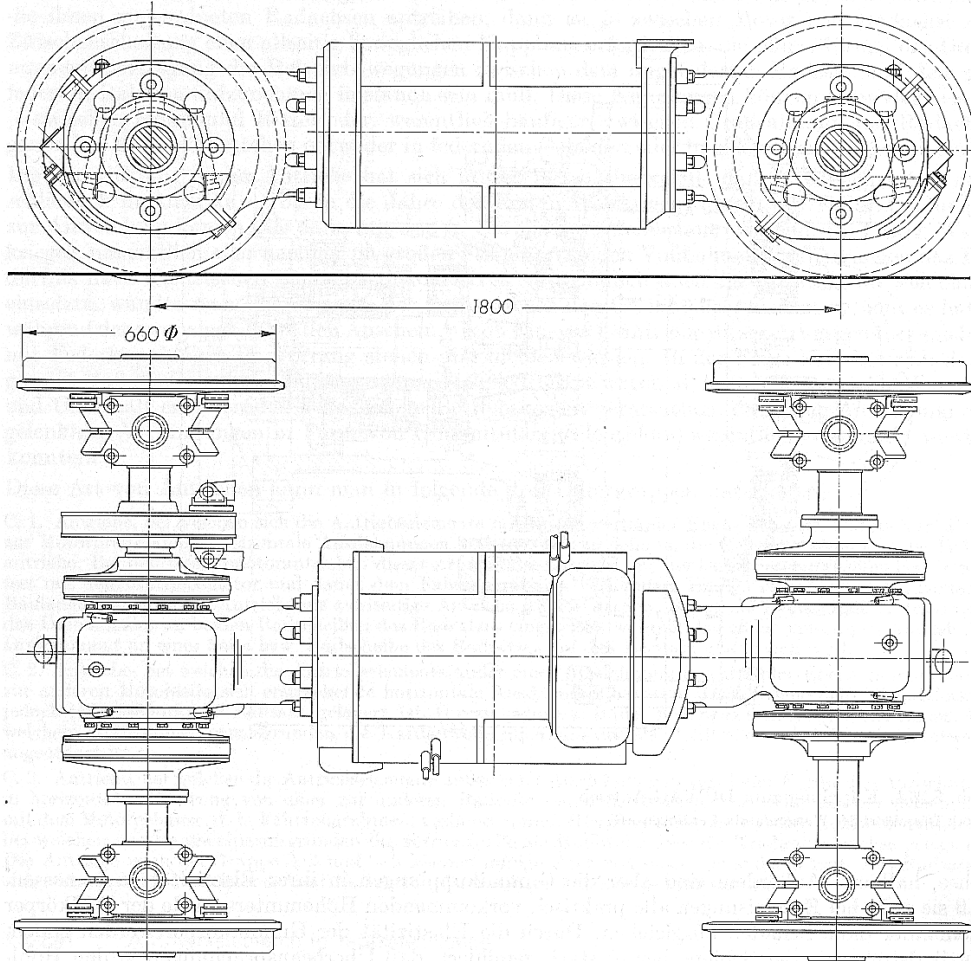


Bild 3.28 DÜWAG-Antrieb [77]
(Werk Düsseldorf der Waggonfabrik Uerdingen AG)

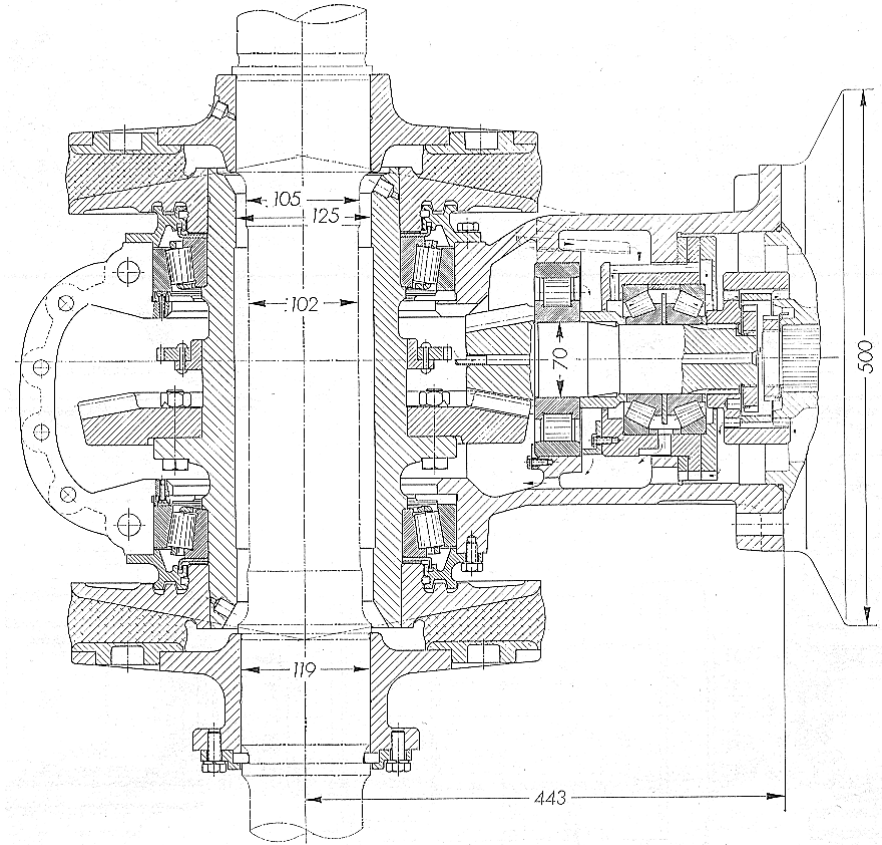


Bild 3.29 Kupplung zum DÜWAG-Antrieb
(Kegelradgetriebe) [77]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.5 Bremskonzepte

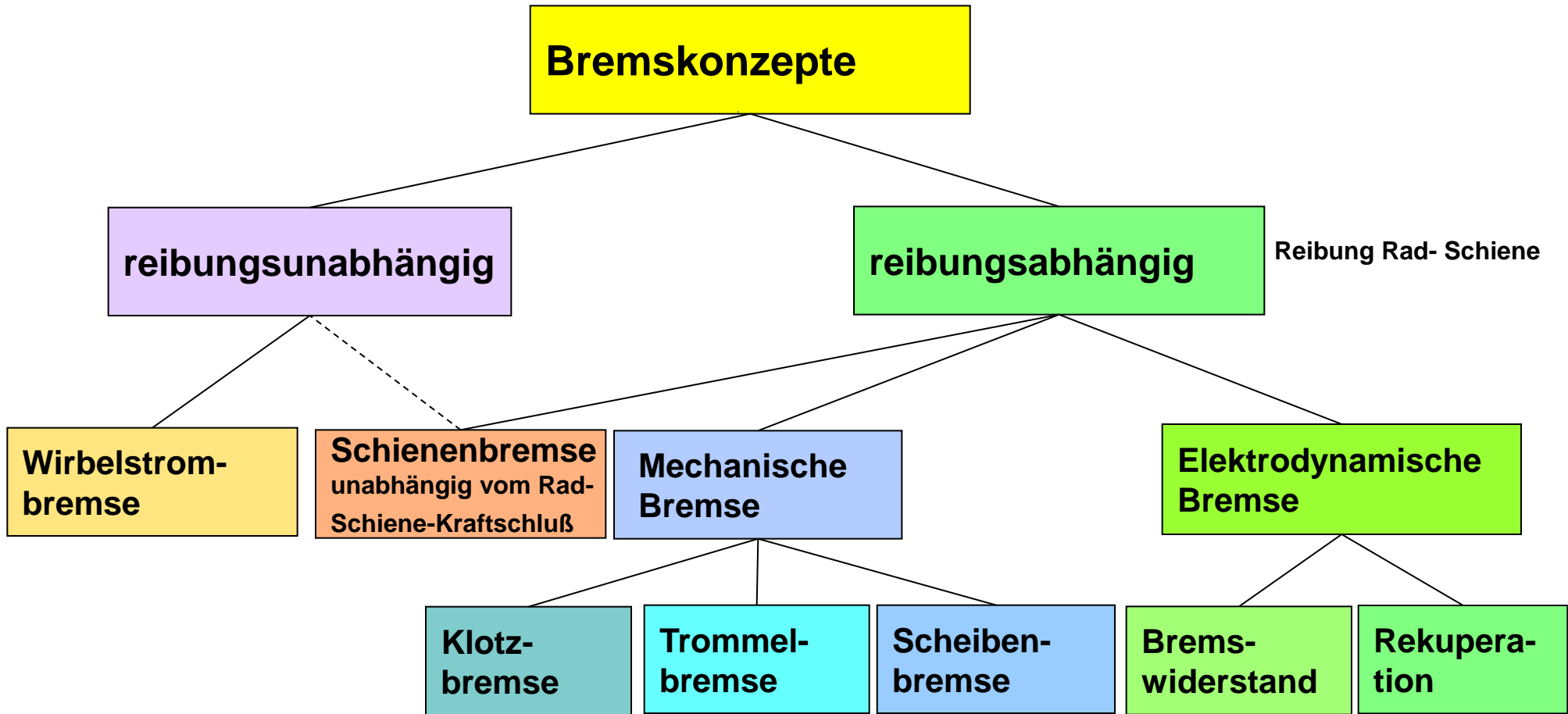


Bild 3.30 Einteilung der Bremskonzepte



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Bremsweg eines Zuges

$$m_{Zug} \cdot a_b \cdot \xi = m_{Brems} \cdot g \cdot \mu$$

$$a_b = \frac{g \cdot \mu}{\xi} \cdot \frac{m_{Brems}}{m_{Zug}}$$

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a_b}$$

$$\text{Bremshundertstel} = \frac{m_{Brems}}{m_{Zug}} \cdot 100$$

Bremsweg von Zügen

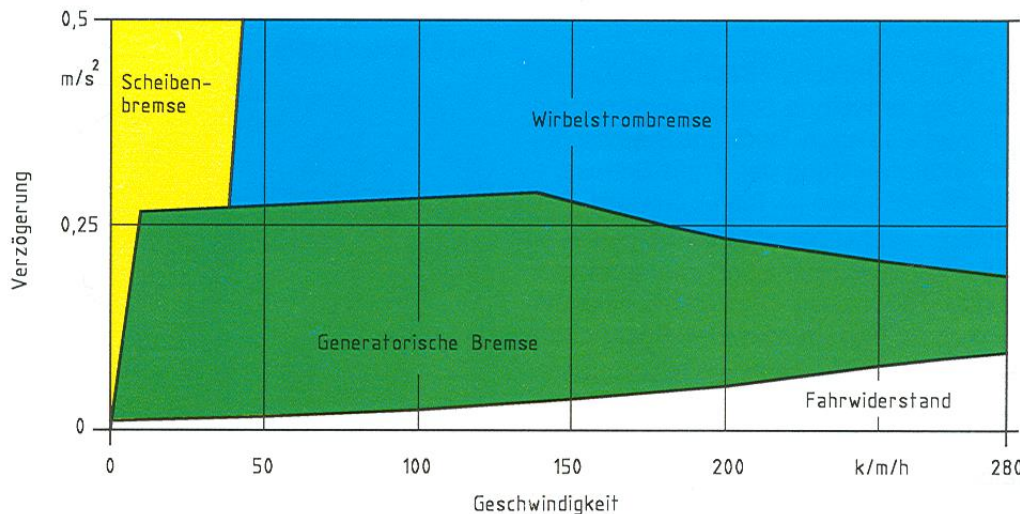
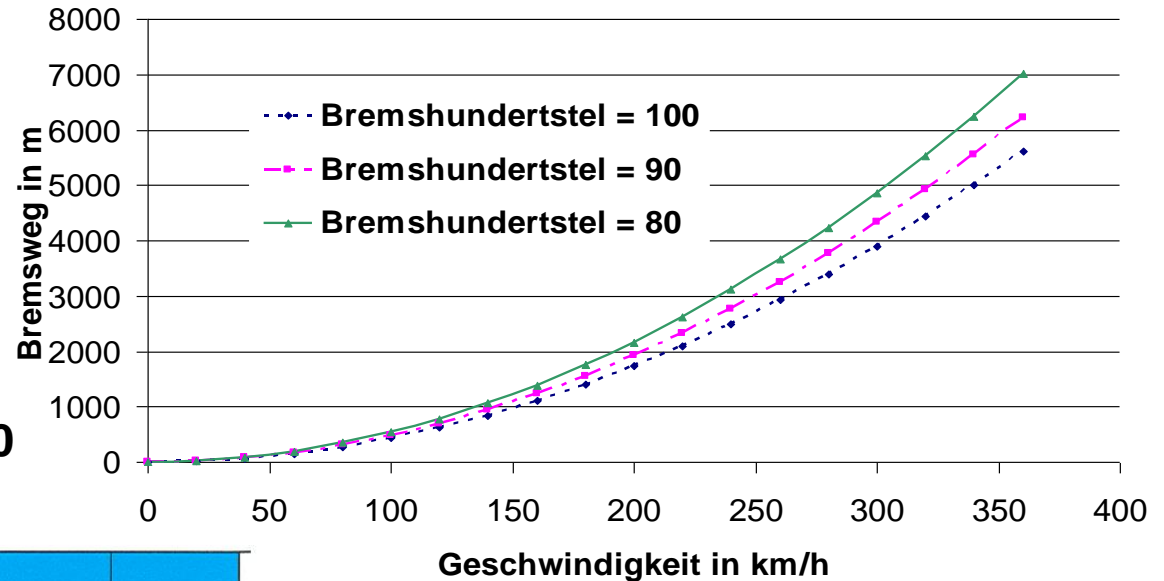


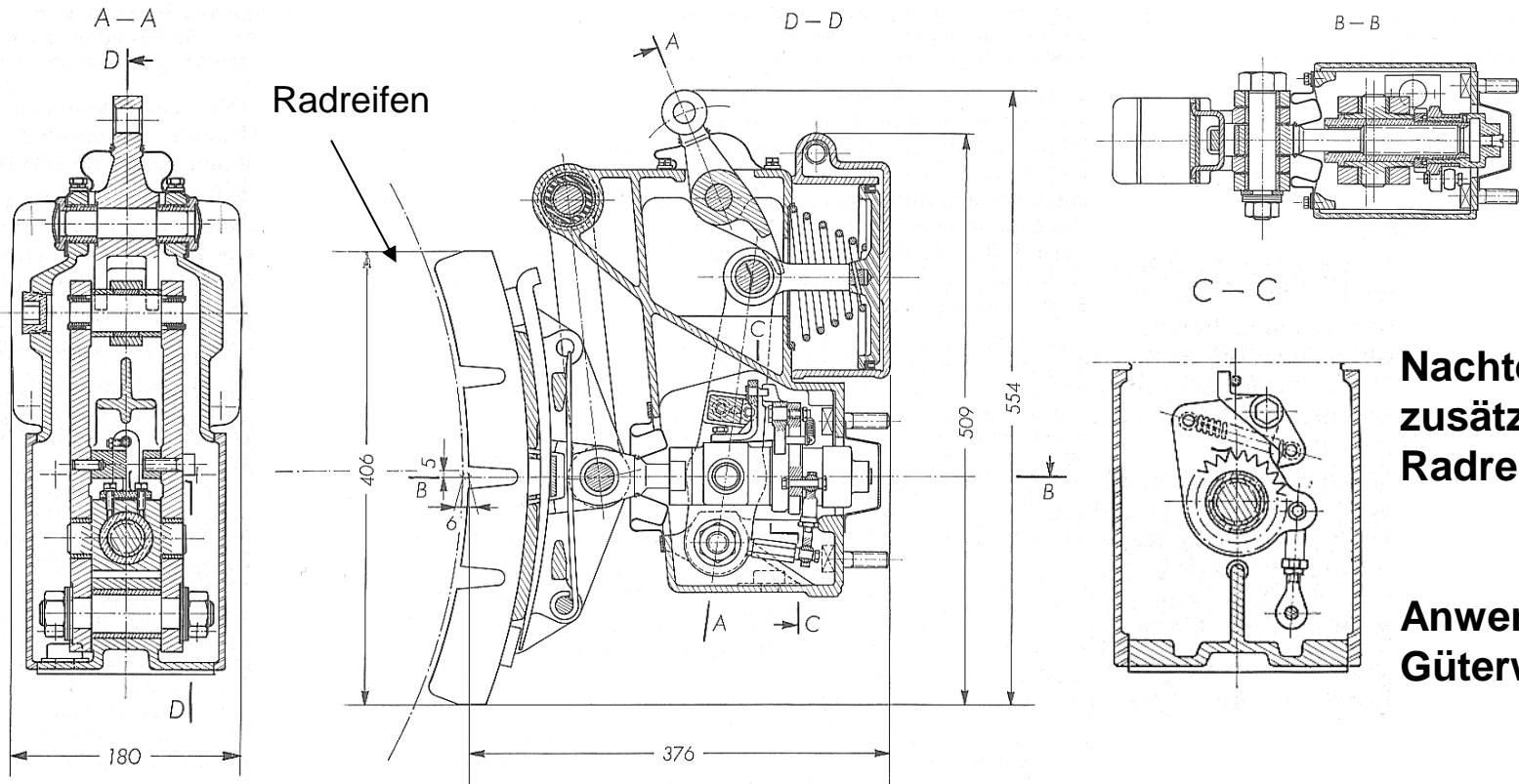
Bild 3.31 Bremsweg in Abhängig der Geschwindigkeit $\mu = 0,1 \quad \xi = 1,1$

Bild 3.32 Zusammenwirkung der Bremseinrichtungen ICE mit 12 Mittelwagen [68]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.5.1 Klotzbremse



Nachteil:
zusätzlicher
Radreifenverschleiß

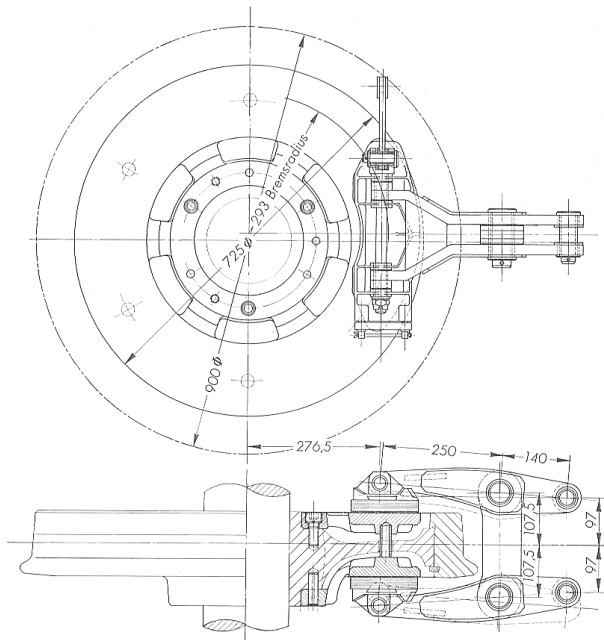
Anwendung:
Güterwagen

Bild 3.33 Bremsblock für individuelle Bremsung jedes Rades eines Radsatzes durch einen eigenen Bremszylinder (Alstom) [77]

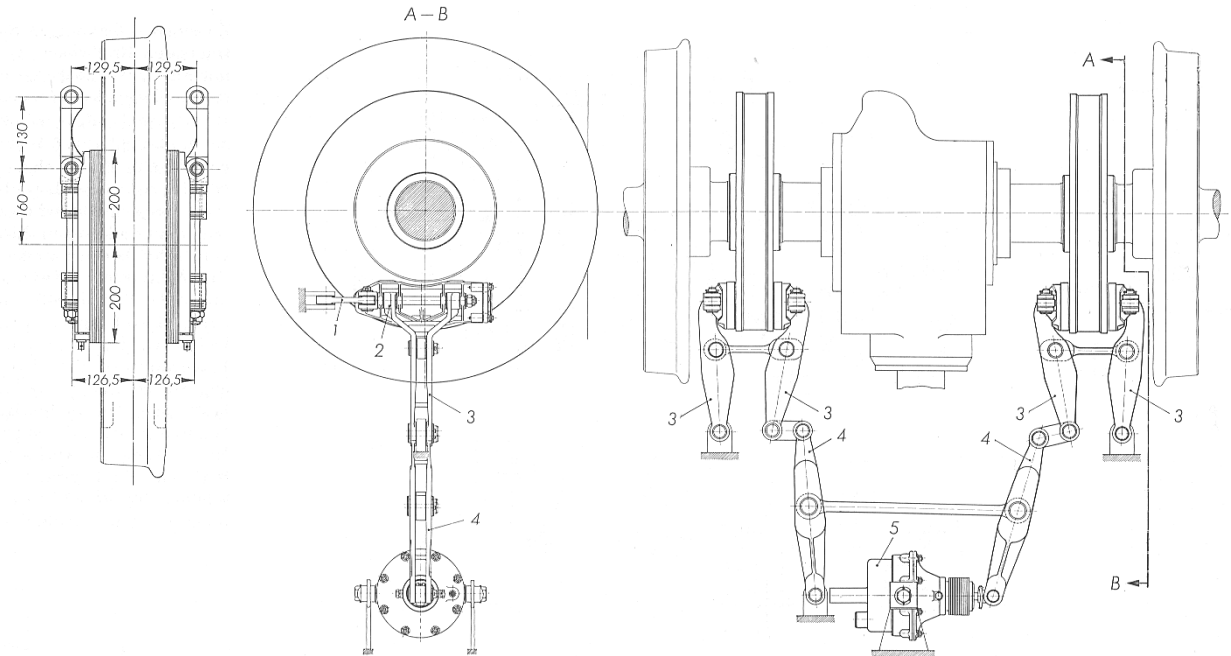


3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.5.2 Scheibenbremse



**Bild 3.34 Radscheibe mit befestigter
Bremscheibe**
Normalausführung der DB [77]



- 1 Aufhängevorrichtung
- 2 Bremsbackenhalter
- 3 Bremszange

- 4 Übertragungsgestänge
- 5 Bremszylinder

**Bild 3.35 Gestänge für Scheibenbremse
bei Anordnung zweier Bremscheiben
auf der Achse (Knorr-Bremse GmbH, München) [77]**



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.5.2 Magnetschienenbremse

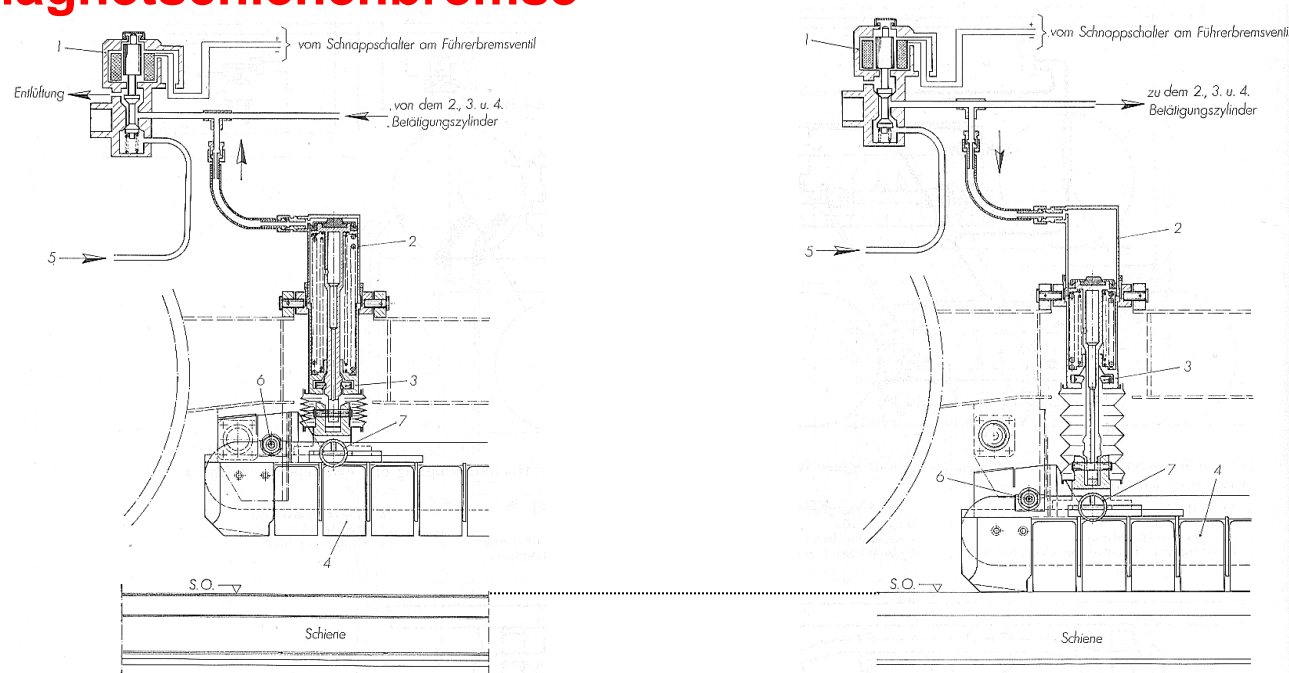


Bild 3.36 Magnetschienenbremse für Hochaufhängung mit Federspeicherzylinder in Löse- und Bereitschaftsstellung

Bremsstellung (Knorr-Bremse GmbH, München)

- 1 Magnetventil (nicht erregt)
- 2 Betätigungszyylinder (entlüftet)
- 3 sechsstellige Sperrscheibe
- 4 Bremsmagnet (in Hochlage)
- 5 Anschluß von der Hauptluftbehälterleitung
- 6 Kabelzuführung
- 7 Spurhalter

- 1 Magnetventil (erregt)
- 2 Betätigungszyylinder (belüftet)
- 3 sechsstellige Sperrscheibe
- 4 Bremsmagnet (abgesenkt)
- 5 Anschluß von der Hauptluftbehälterleitung
- 6 Kabelzuführung
- 7 Spurhalter



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

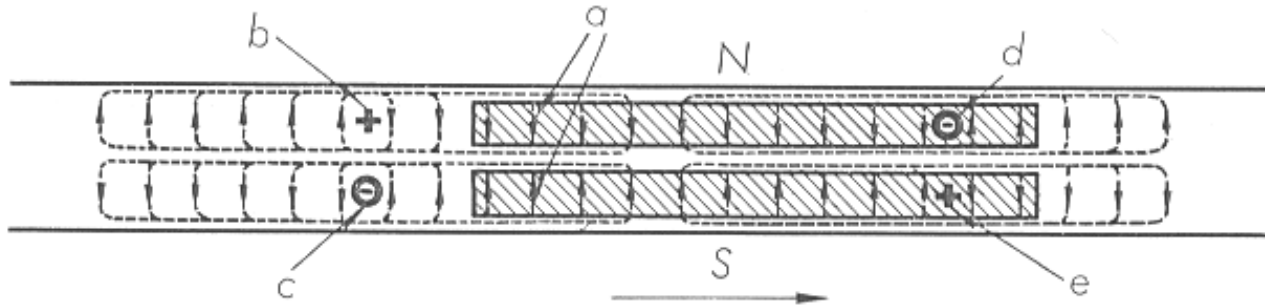


Bild 3.37 Verlauf der von einer Magnetschienebremse in der Schiene erzeugten Wirbelströme [68]

- N Nordpol des Bremsmagneten
- S Südpol des Bremsmagneten
- a Richtung und Verlauf der Wirbelströme im Grundriß der Schiene gesehen
- b,c die Bremskraft verstärkende Wirbelstrommagnetfelder
- d,e die Bremskraft schwächende Wirbelstrommagnetfelder

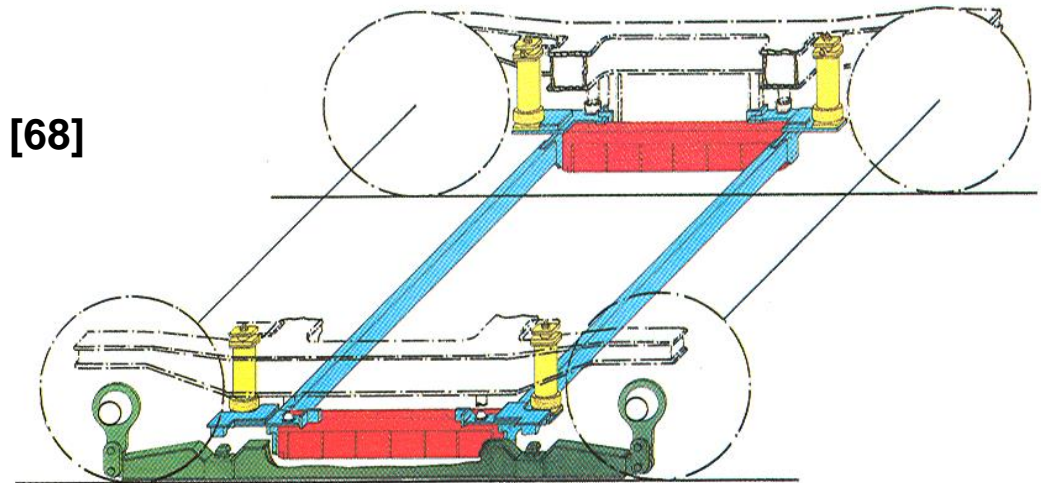


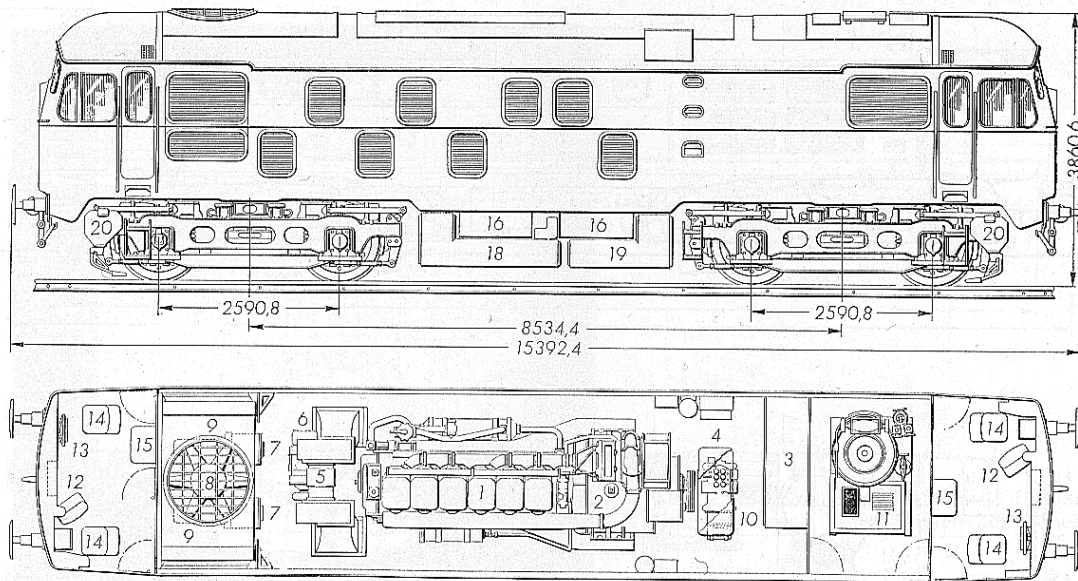
Bild 3.38 Aufhängekonstruktion für Wirbelstrombremse

ICE Mittelwagen [68]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

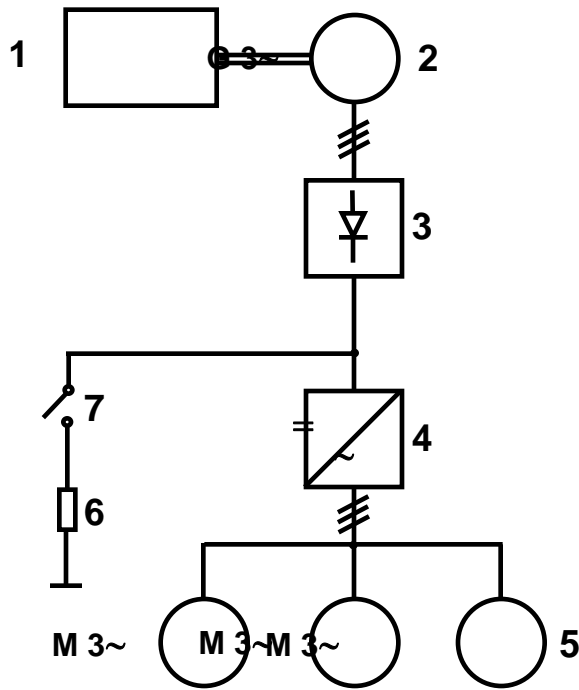
3.6 Dieselelektrische Konzepte



- 1 Sechszylinder - Viertaktdieselmotor
- 2 Hauptgenerator
- 3 Steuerapparatur
- 4 Kompressor
- 5 Ventilatormotorgruppe
- 6 Brennstoff,- Öl- und Wasserpumpengruppe
- 7 Luftsaugepumpe
- 8 Ventilator für Kühler
- 9 Kühler
- 10 Getriebe
- 11 Kessel für Zugheizung
- 12 Steuerschalter - Führersand
- 13 Handbremse
- 14 Sitz für Lokomotivführer und Beimann
- 15 Kleiderschrank
- 16 Batterie
- 18 Brennstofftank
- 19 Wassertank
- 20 Sandkasten

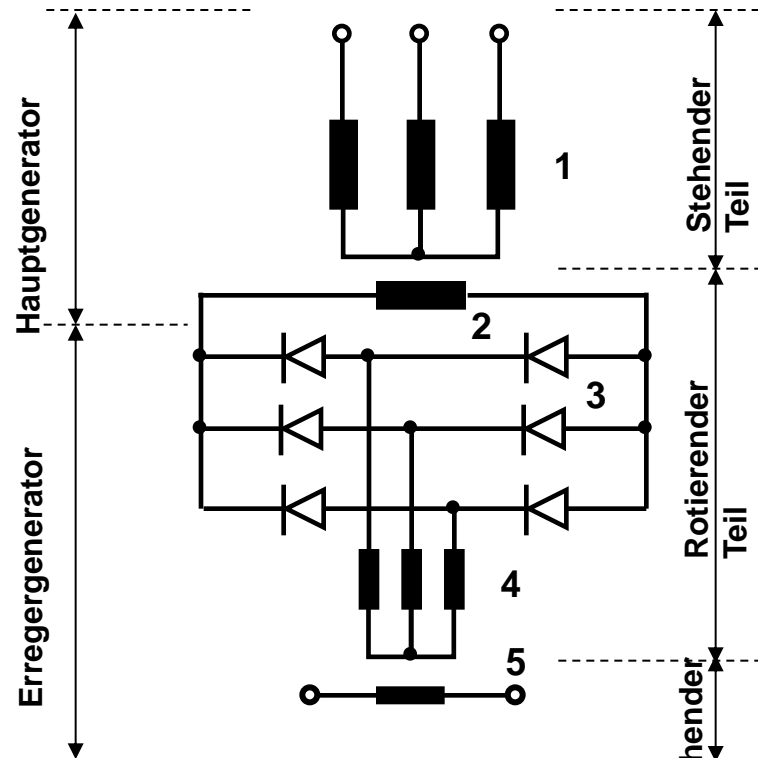
Bild 3.39 Dieselelektrische Lokomotive Bo'Bo' der Serie D5000 der BR [47]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Dieselmotor
- 2 Synchron-Generator
- 3 Dioden-Gleichrichter
- 4 PWM-Wechselrichter
- 5 Asynchrontraktionsmotor
- 6 Bremswiderstand
- 7 Bremsschütze

Bild 3.40 Hauptschaltplan einer dieselektrische Lokomotive

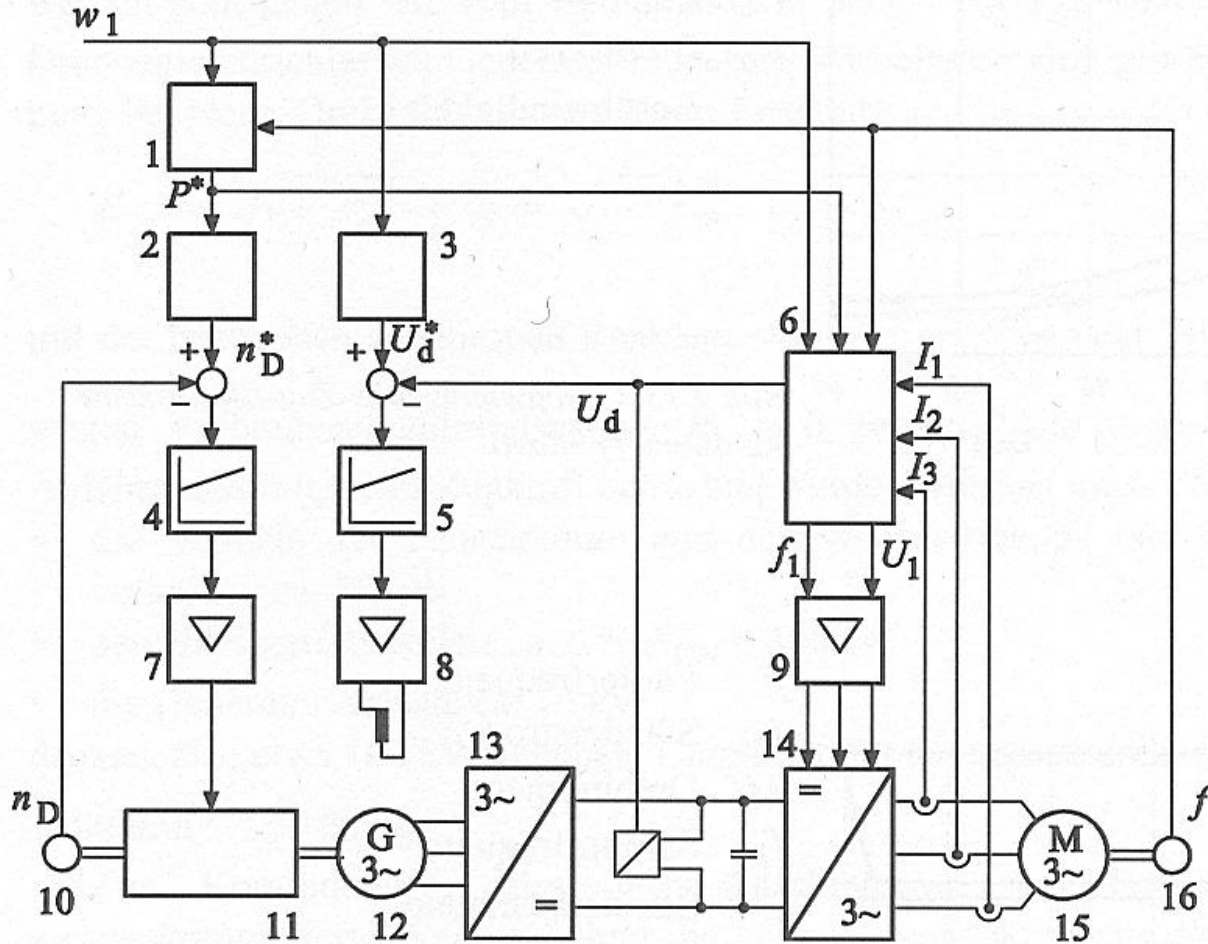


- 1 Ständerwicklung Hauptgenerator
- 2 Erregerwicklung Hauptgenerator
- 3 Dioden- B6-Gleichrichter
- 4 Ankerwicklung Erregergenerator
- 5 Erregerwicklung Erregergenerator

Bild 3.41 Bürstenloser Synchrongenerator
Mitrotierende Diodenbrücken



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Leistungssollwertgeber
- 2 Sollwertkurve n_D
- 3 Sollwertkurve U_d
- 4 Dieseldrehzahlregler
- 5 Du - Regler
- 6 Fahrmotorregelung
- 7 Füllungsregler
- 8 Erregerstromstellglied
- 9 WR-PWM- Steuerung
- 10 Tachometer Diesel
- 11 Dieselmotor
- 12 Drehstromgenerator
- 13 Diodenbrücke
- 14 Wechselrichter
- 15 Fahrmotor
- 16 Fahrmotor-Impulsgeber

Bild 3.42 Regelstruktur einer dieselektrische Lokomotive [77]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

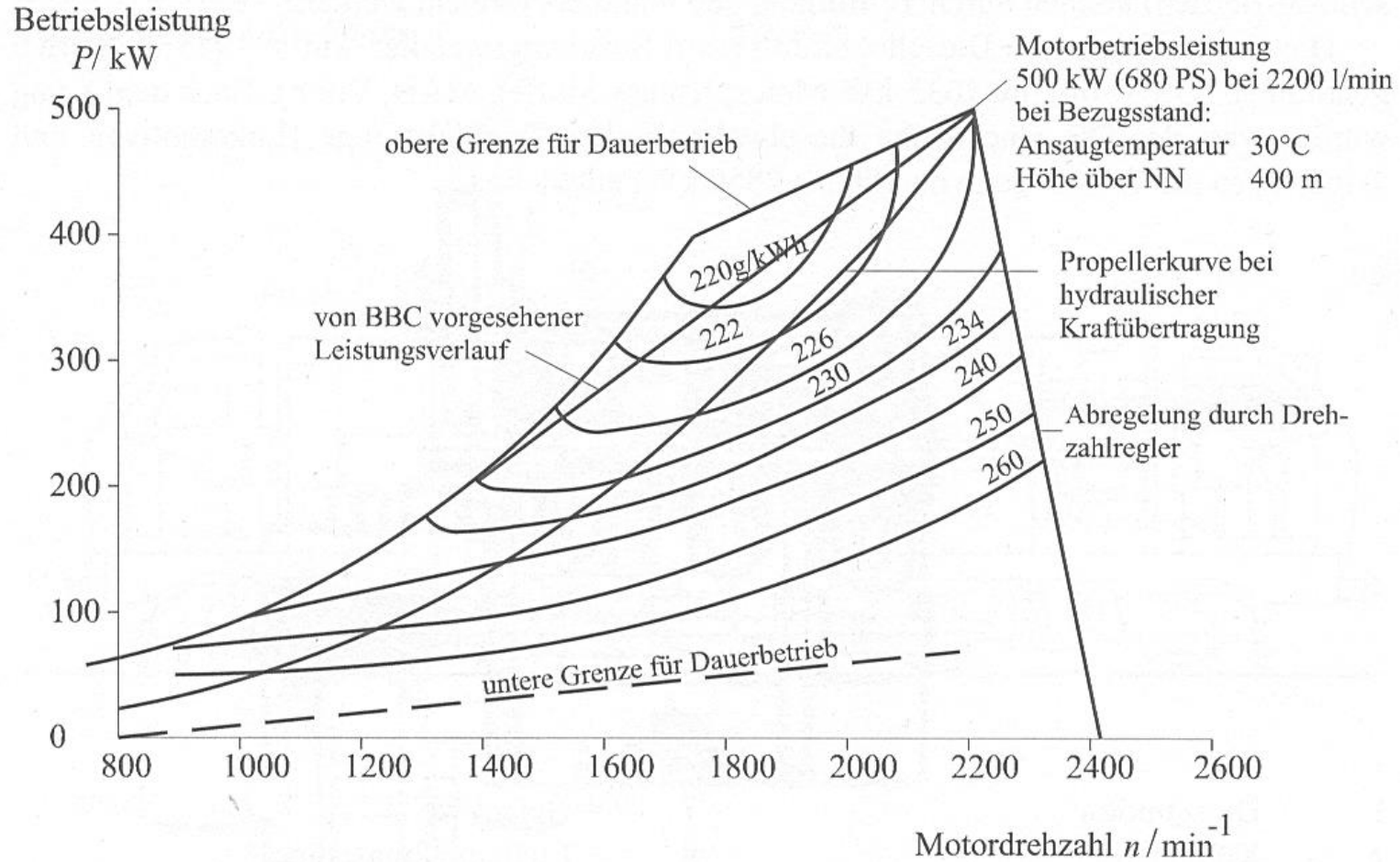


Bild 3.43 Kennlinienfeld des Dieselmotors MTU 6V 331 TC 12 (500kW) [77]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

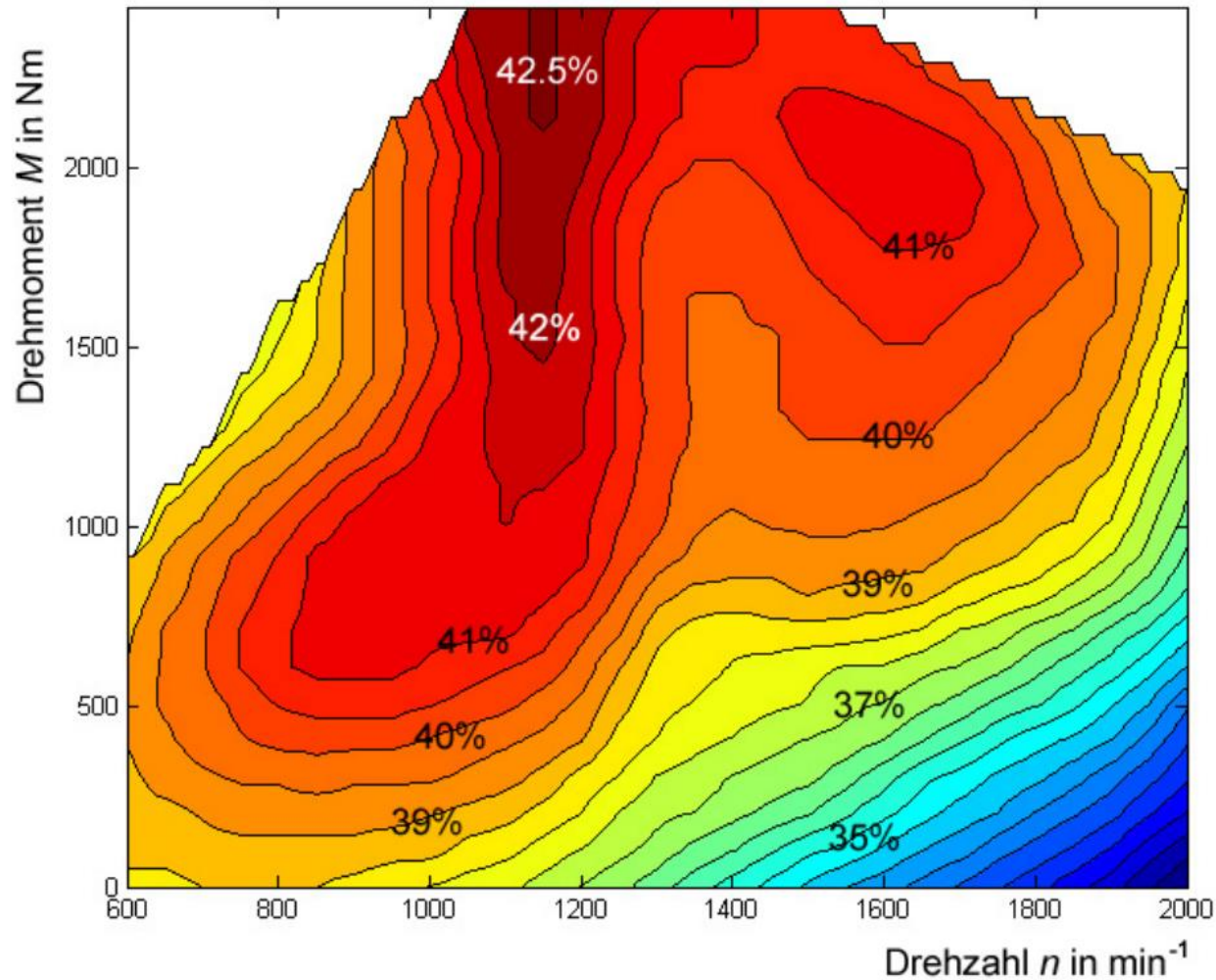


Bild 3.44 Muscheldiagramm eines Dieselmotors (Wirkungsgradkennlinienfeld) [87]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

3.7 Beispiel einer modernen Lokomotivfamilie



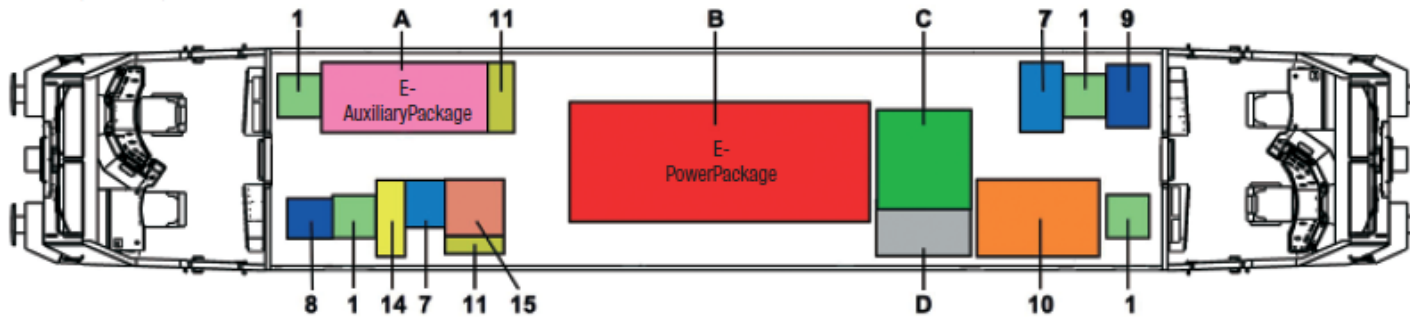
Bild 3.45 Bombardier TRAXX-Lok-Plattform AC / DC / MS / DE mit Kenndaten [13]

Lokomotivtyp		AC	DC	MS	DE
Netzspannung	AC	15 kV & 25 kV	-	15 kV & 25 kV	-
	DC	-	3 kV	1,5 kV & 3 kV	-
Höchstgeschwindigkeit		140 km/h	140 km/h	140 km/h	140 km/h
		160 km/h	160 km/h	160 km/h	160 km/h
		200 km/h	200 km/h	200 km/h	-
Anfahrzugkraft		300 kN	300 kN	300 kN	270 kN
Dauerleistung ¹⁾		5,6 MW	5,6 MW	5,6 MW (DC 1,5 kV: 4 MW)	2,2 MW
Gesamtlänge		18,9 m	18,9 m	18,9 m	18,9 m
Gesamtgewicht ²⁾		82 t	81 t	85 t	80 t
Tankvolumen		-	-	-	4000 Liter

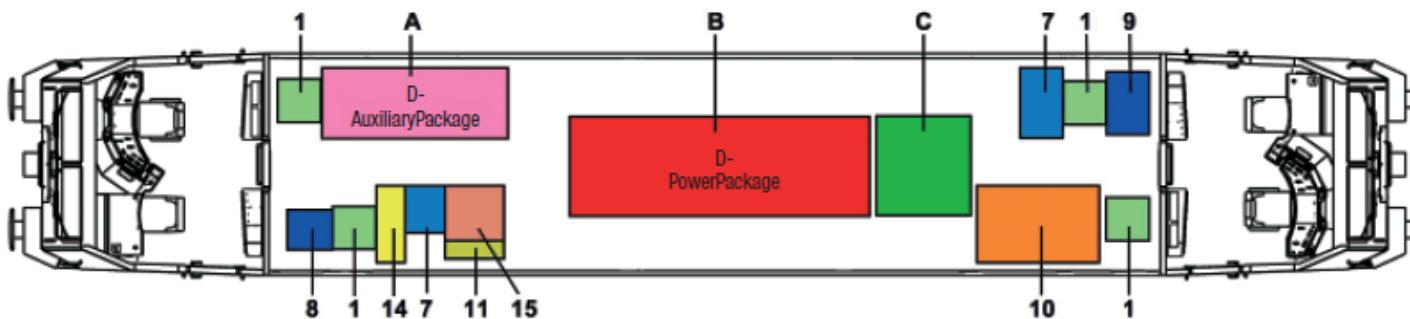


3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

AC-, DC-, MS-Lokomotiven



DE-Lokomotiven



- 1 Fahrmotorlüfter
- 2 Hochspannungsgerüst (AC)
- 3 Hilfsbetriebegegerüst
- 4 Hilfsbetriebestromrichter
- 5 Antriebsstromrichter
- 6 Kühlturm
- 7 Zugsicherungsschrank
- 8 Elektronenschrank
- 9 Niederspannungsgerüst
- 10 Druckluftgerüst
- 11 Geräteschrank
- 12 Hilfsbetriebe-transformator
- 13 Hochspannungsgerüst (DC)
- 14 Brandlöschanlage
- 15 Bremswiderstand
- A AuxiliaryPackage
- B PowerPackage
- C Zentralkühlanlage
- D Saugkreiskondensatorgerüst

Bild 3.46 TRAXX-Layout AC-, DC-, MS- und DE-Lokomotiven [13]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

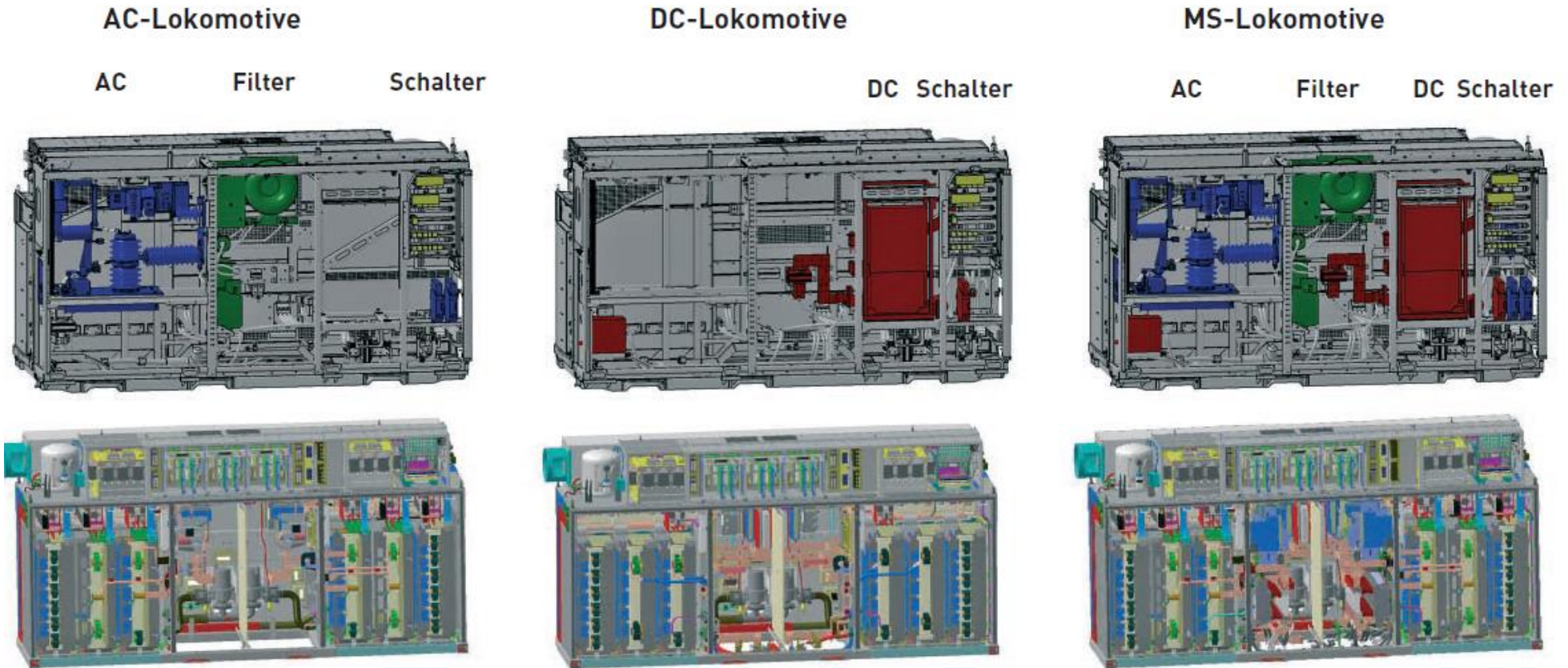
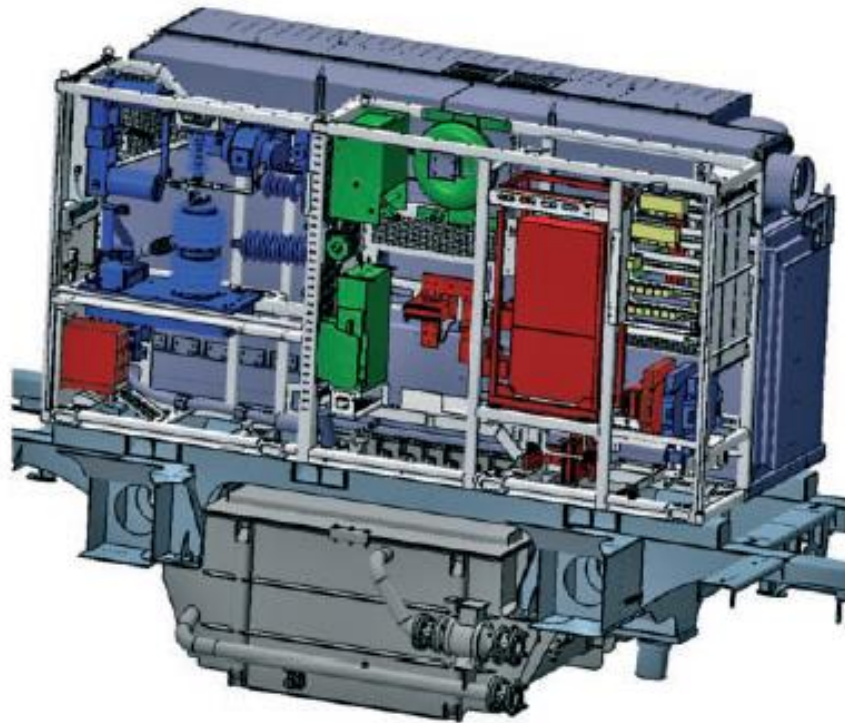
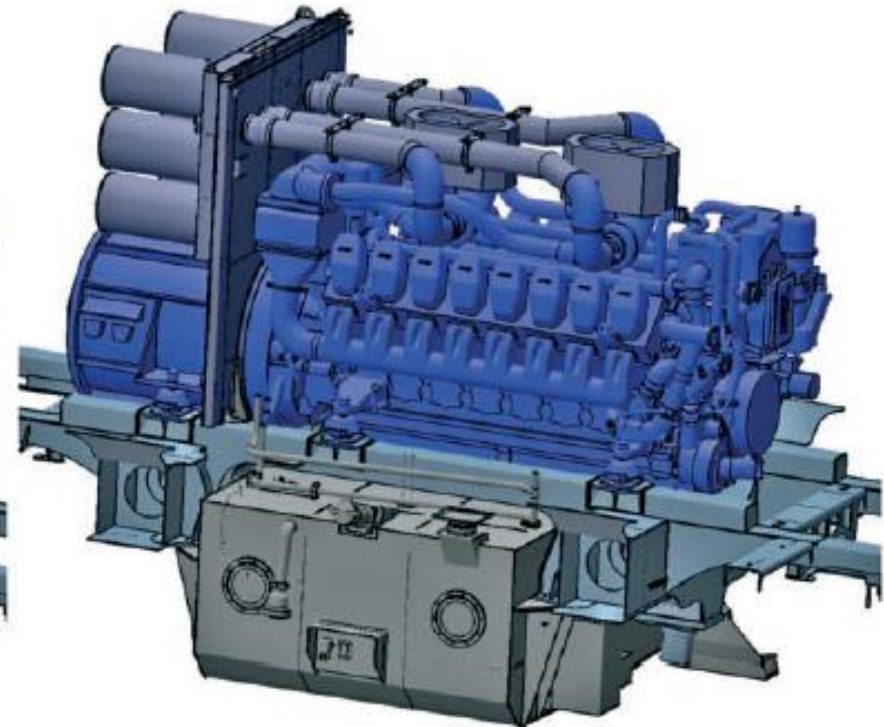


Bild 3.47 Modulare Bestückung des E-Power-Packages je Lokomotivtyps [13]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



E - Powerpackage mit Hochspannungs-Stromrichterbereich sowie Transformator



**D - Powerpackage mit Generator
Dieselmotor, Luftfilter sowie Kraftstofftank**

Bild 3.48 Aufbau von E- und D- Power-Package [13]

3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

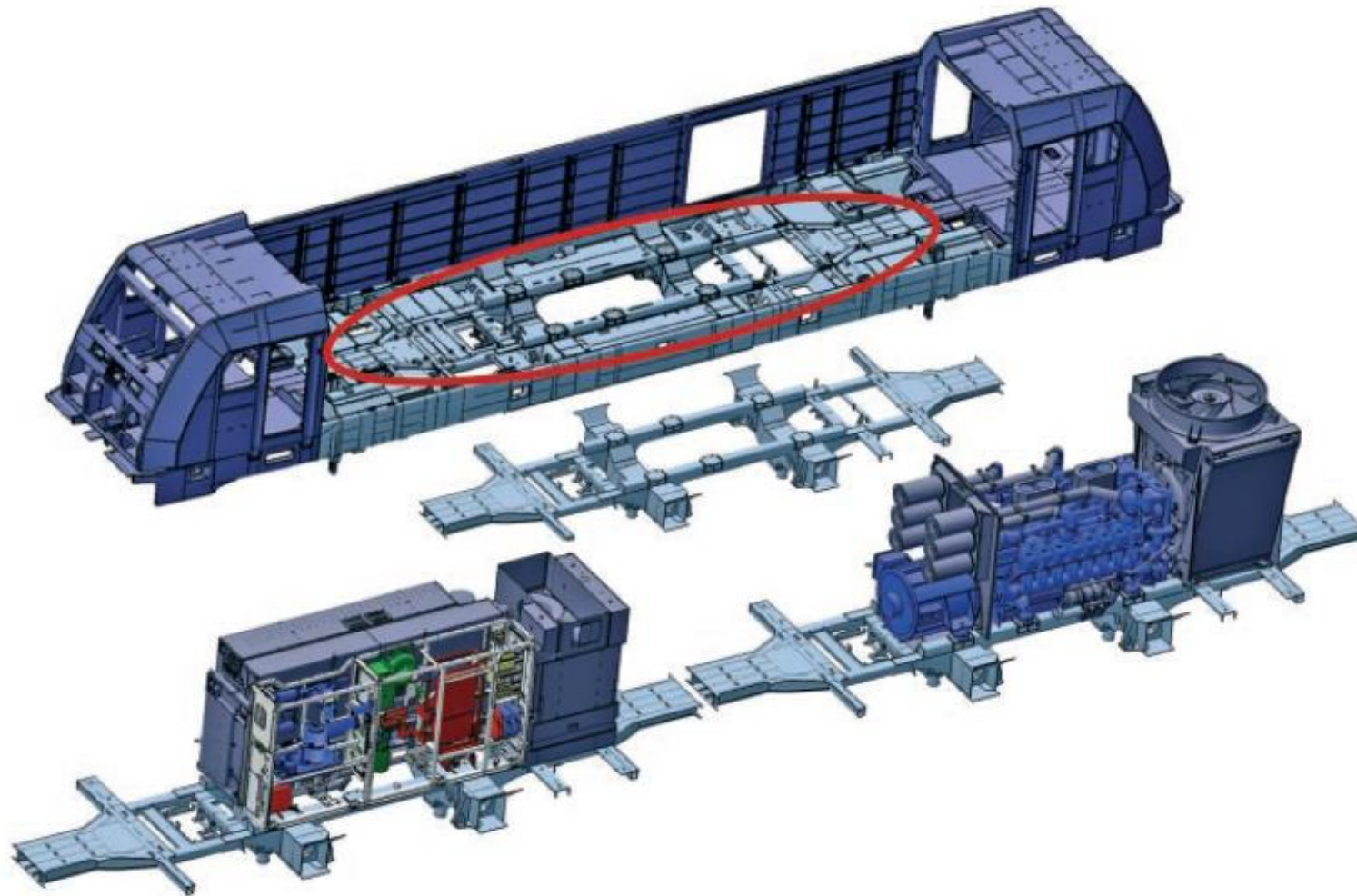
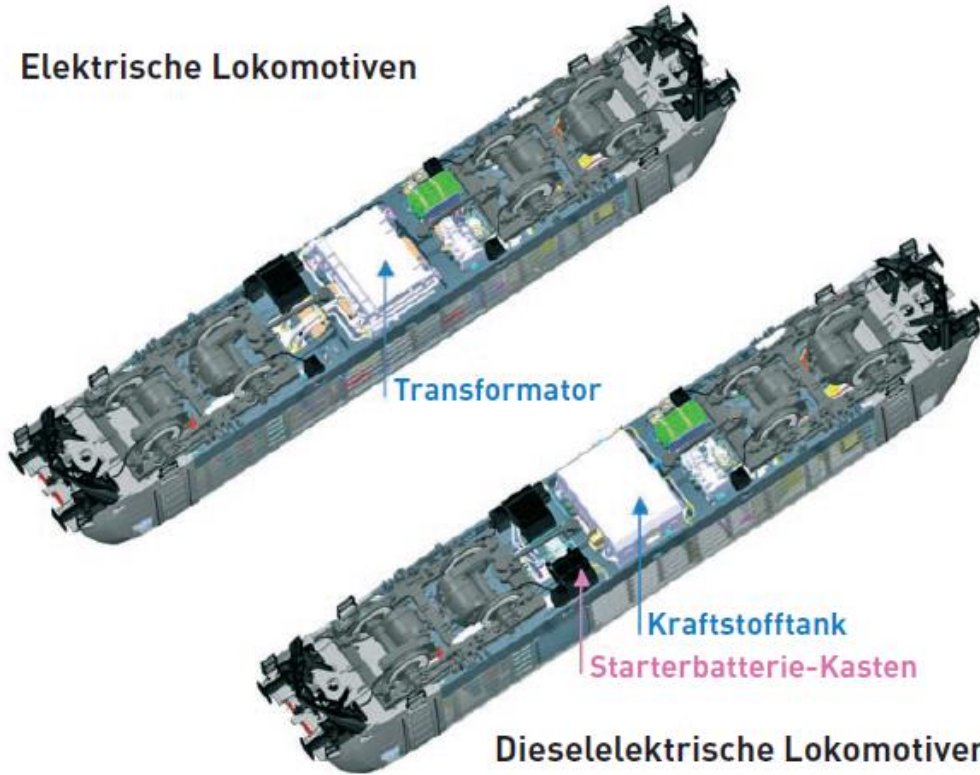


Bild 3.49 Befestigung des E- oder D – Power-Package auf dem Mittellangträger [13]

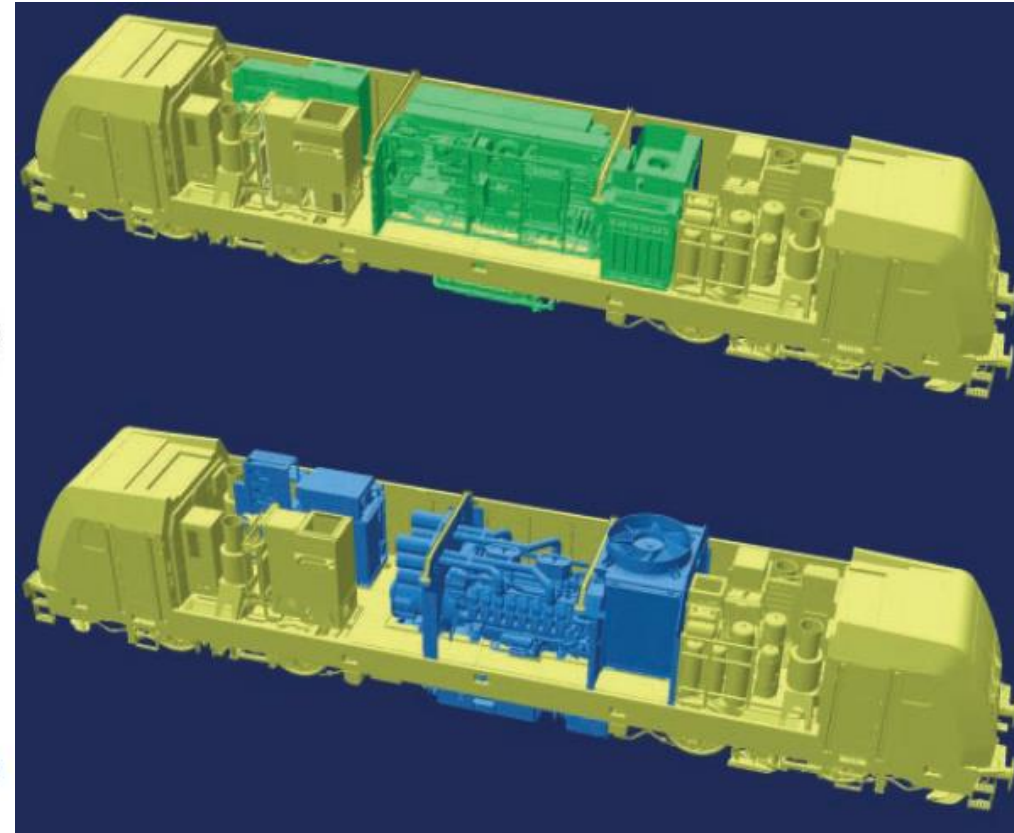
3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Untergestell der elektrischen und dieselektrischen Lok

Elektrische Lokomotiven



Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen elektrischen und dieselektrischen Lok



Bezogen auf die AC-Lokomotive ist der Gleichteileanteil :
bei DC-Loks 85% , bei MS-Loks 90% , und bei DE-Loks 75%

Bild 3.50 E- /D- Gegenüberstellung – Übersicht der Gleichteile [13]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

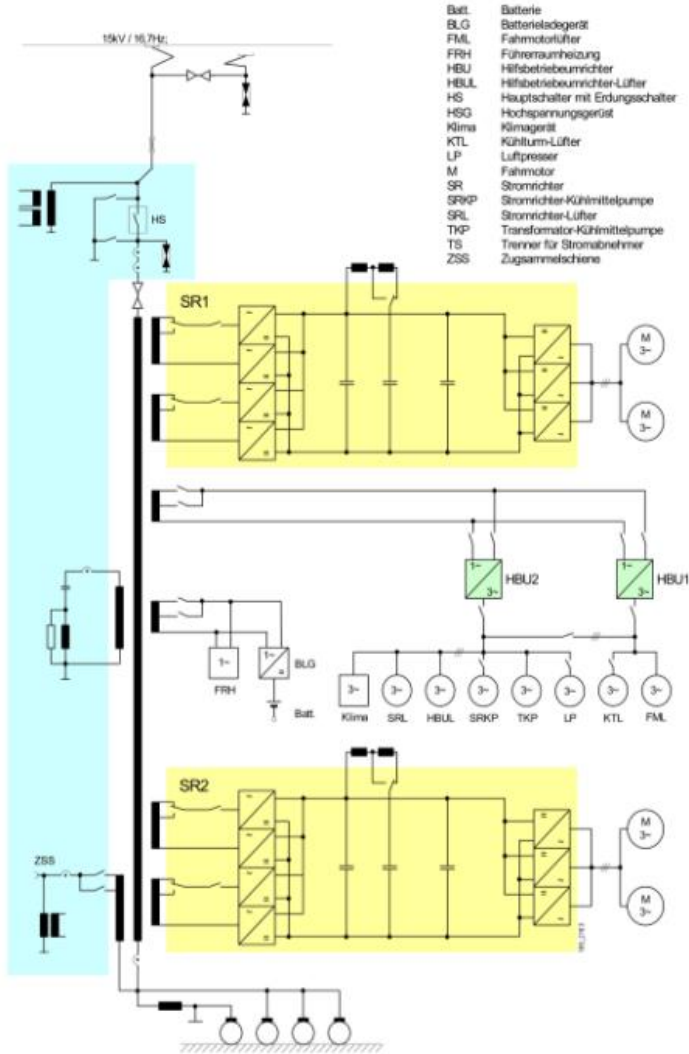


Bild 3. 51 AC- Hauptschaltplan E-Power-Package [13]

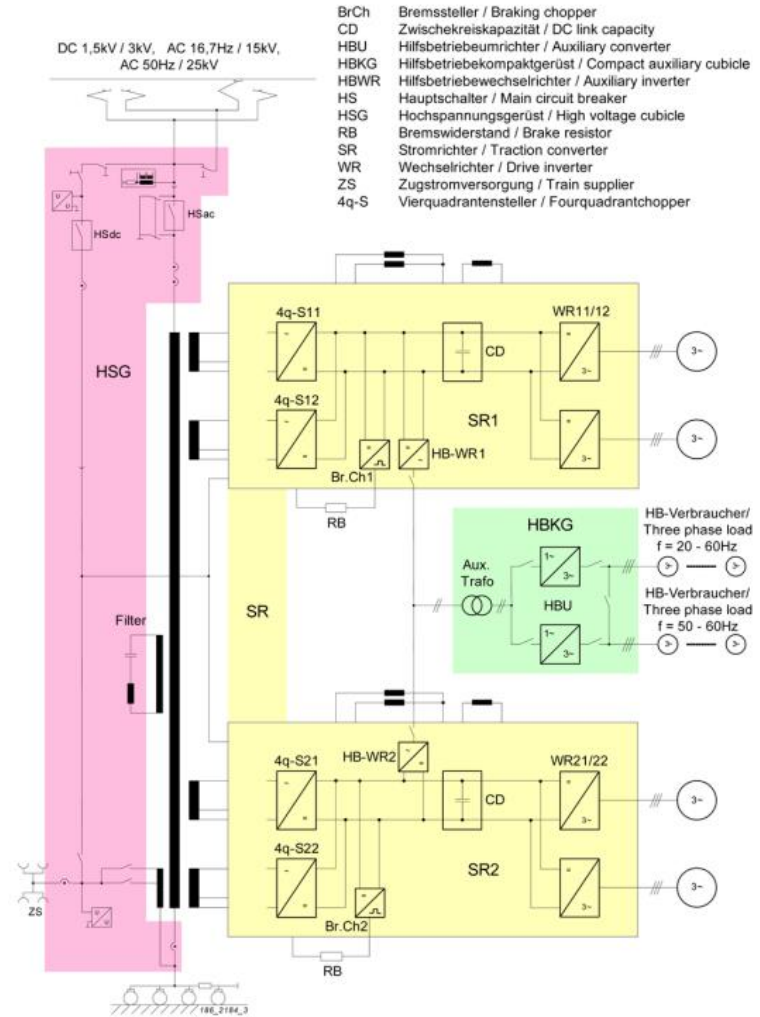


Bild 3. 52 MS- Hauptschaltplan E-Power-Package [13]



3 Mechanischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

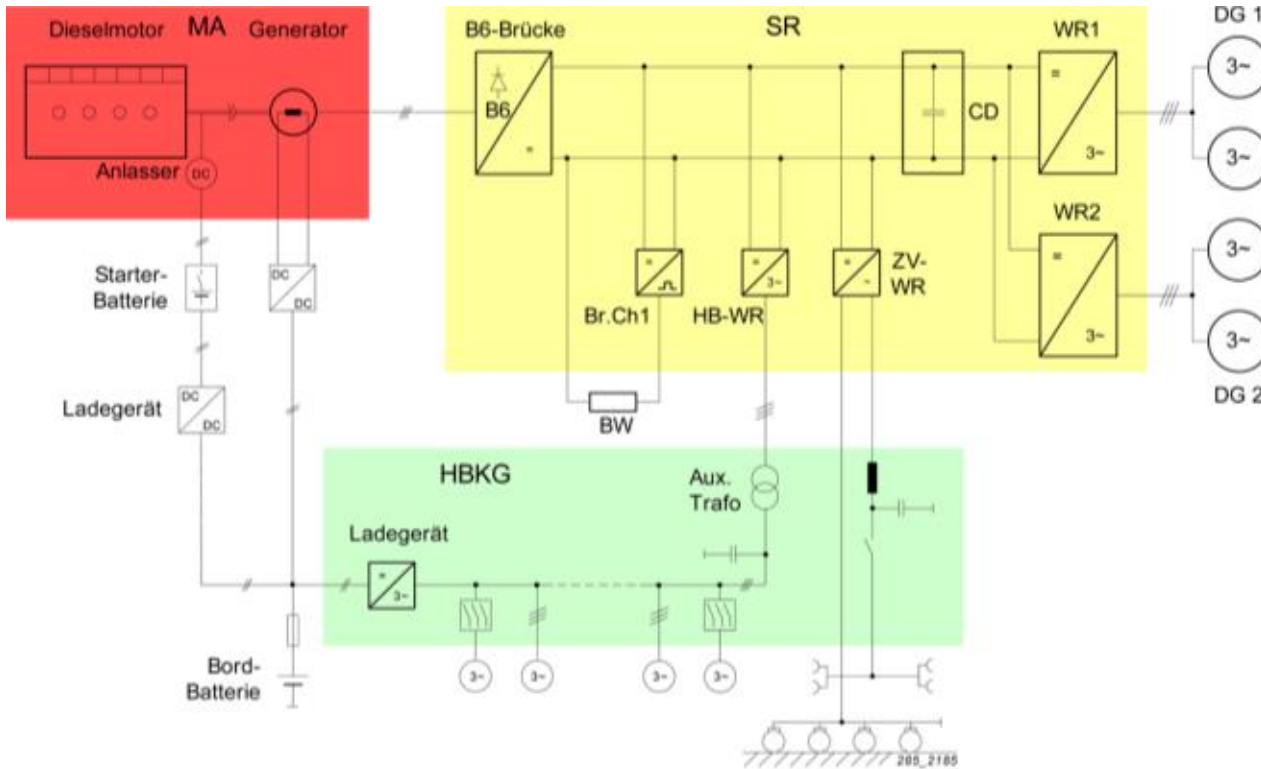


Bild 3.54 Generator [13]

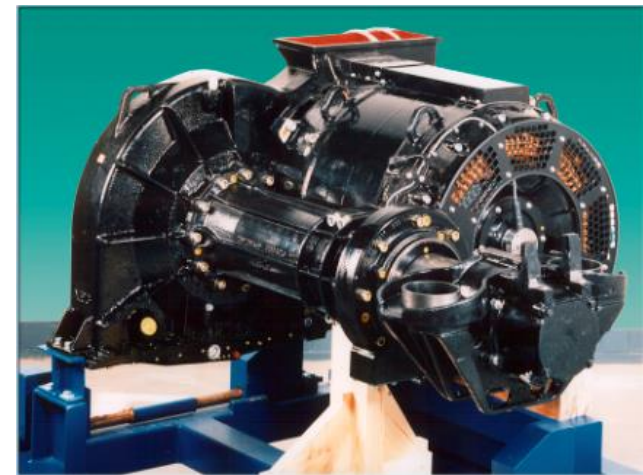


Bild 3.55 Traktionsmotor [13]

Bild 3.53 Hauptschaltplan D-Power-Package [13]



Vorlesungsübersicht

- 4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge**
- 4.1 Hauptstromkreis Gleich- und Wechselstromtriebfahrzeuge
- 4.2 Bahnstromversorgung - Oberleitung
- 4.3 Stromabnehmer
- 4.4 Hauptschalter, Trennschalter, Wandler
- 4.5 Transformatoren
- 4.6 Leistungssteuerung
- 4.7 Traktionsmaschinen
- 4.8 Widerstände
- 4.9 Stromrückführungen
- 4.10 Magnetisches Schweben



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.1 Hauptstromkreise Gleich- u. Wechselstromtriebfahrzeuge

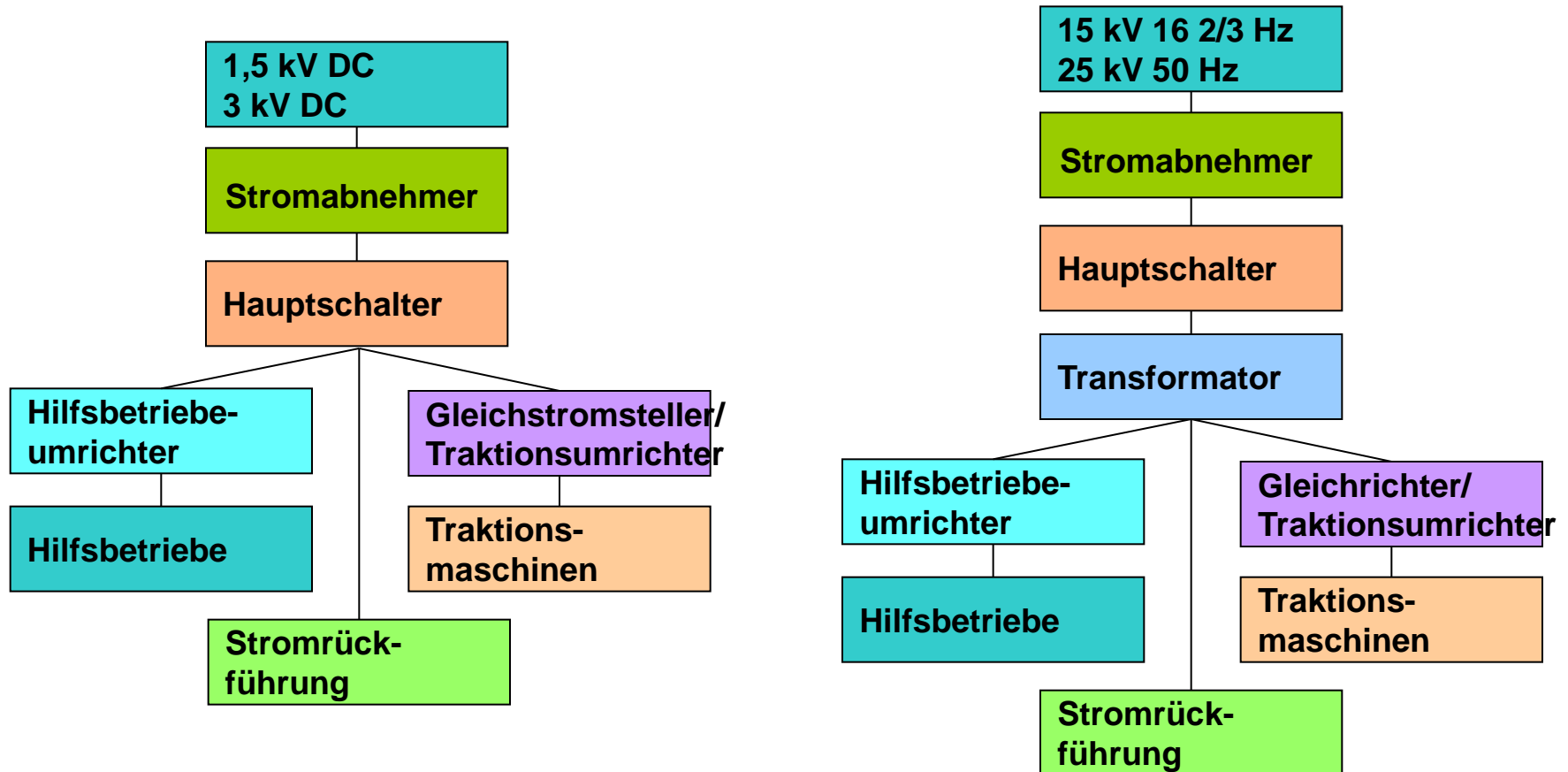


Bild 4.1 Prinzipieller Aufbau der Hauptstromkreise von modernen

Gleichstromtriebfahrzeugen

Wechselstromtriebfahrzeugen



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

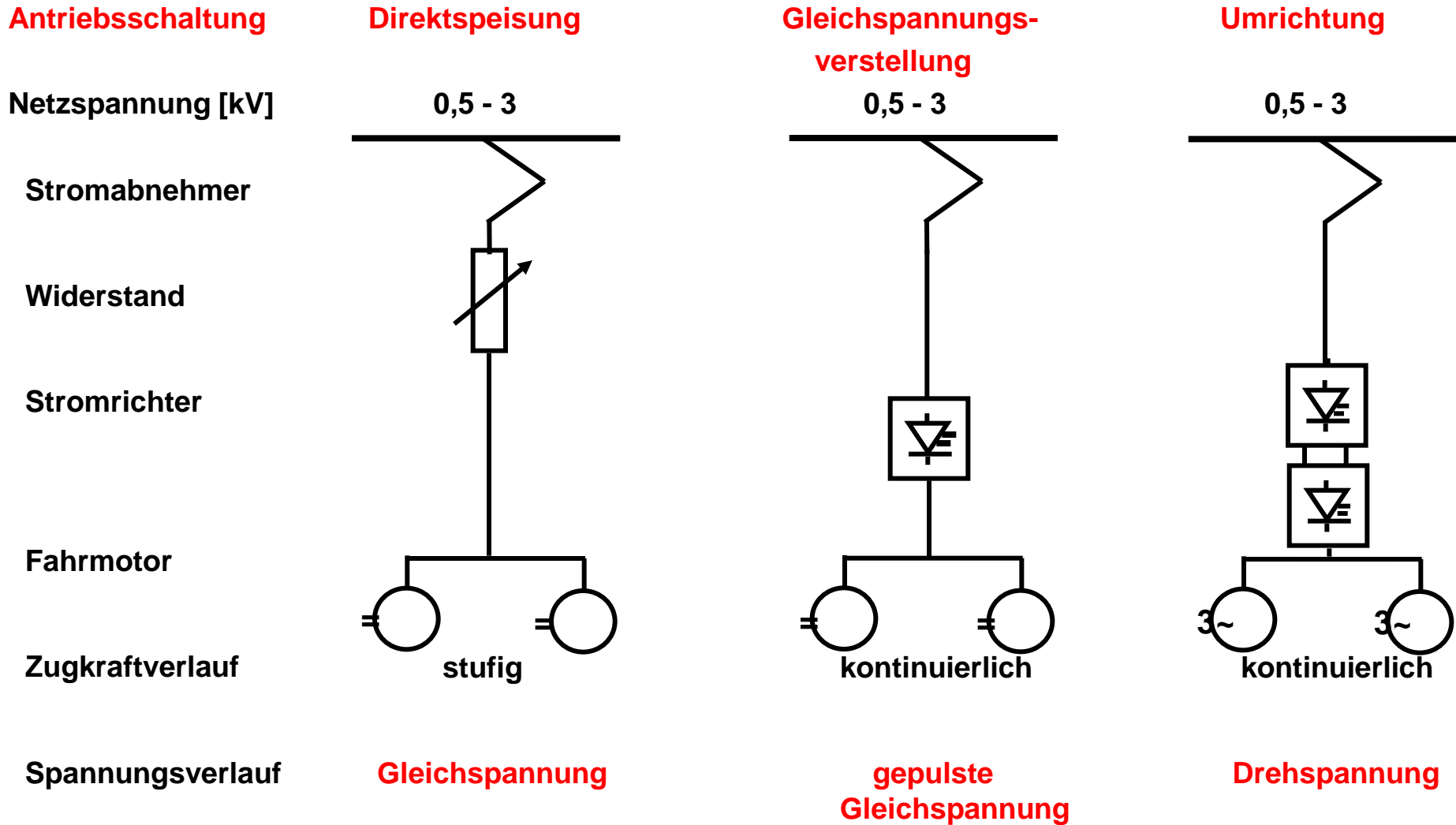


Bild 4.2 Konzepte der Antriebssysteme bei Gleichstromversorgung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

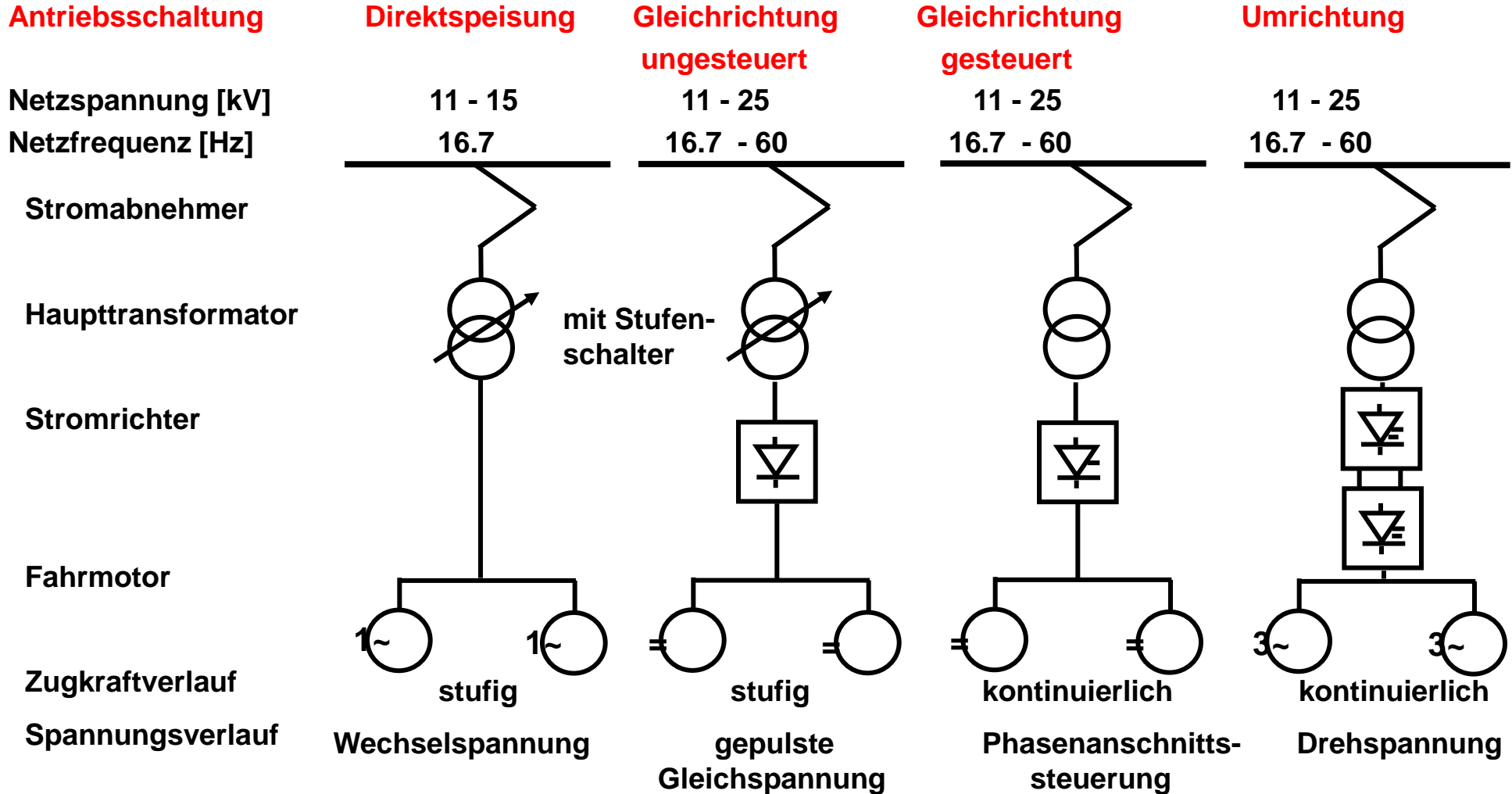


Bild 4.3 Konzepte der Antriebssysteme bei Wechselstromversorgung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

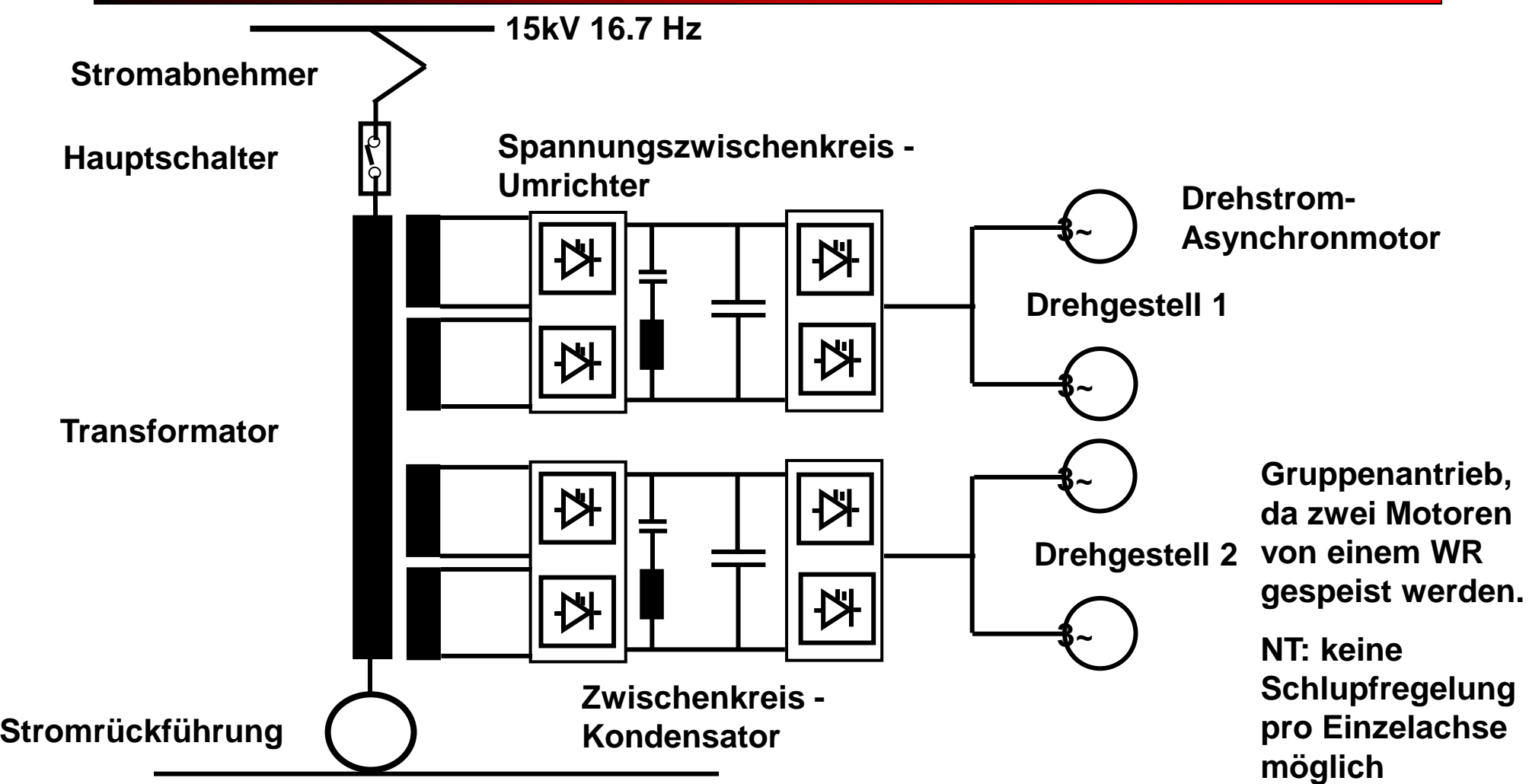


Bild 4.4 Hauptstromkreis einer Bo´Bo´- Lokomotive mit Drehstromtechnik

Spannungszwischenkreis - Umrichter 1 WR / DG (DB 120)



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.2 Bahnstromversorgung – Oberleitungen (siehe Kapitel 8)

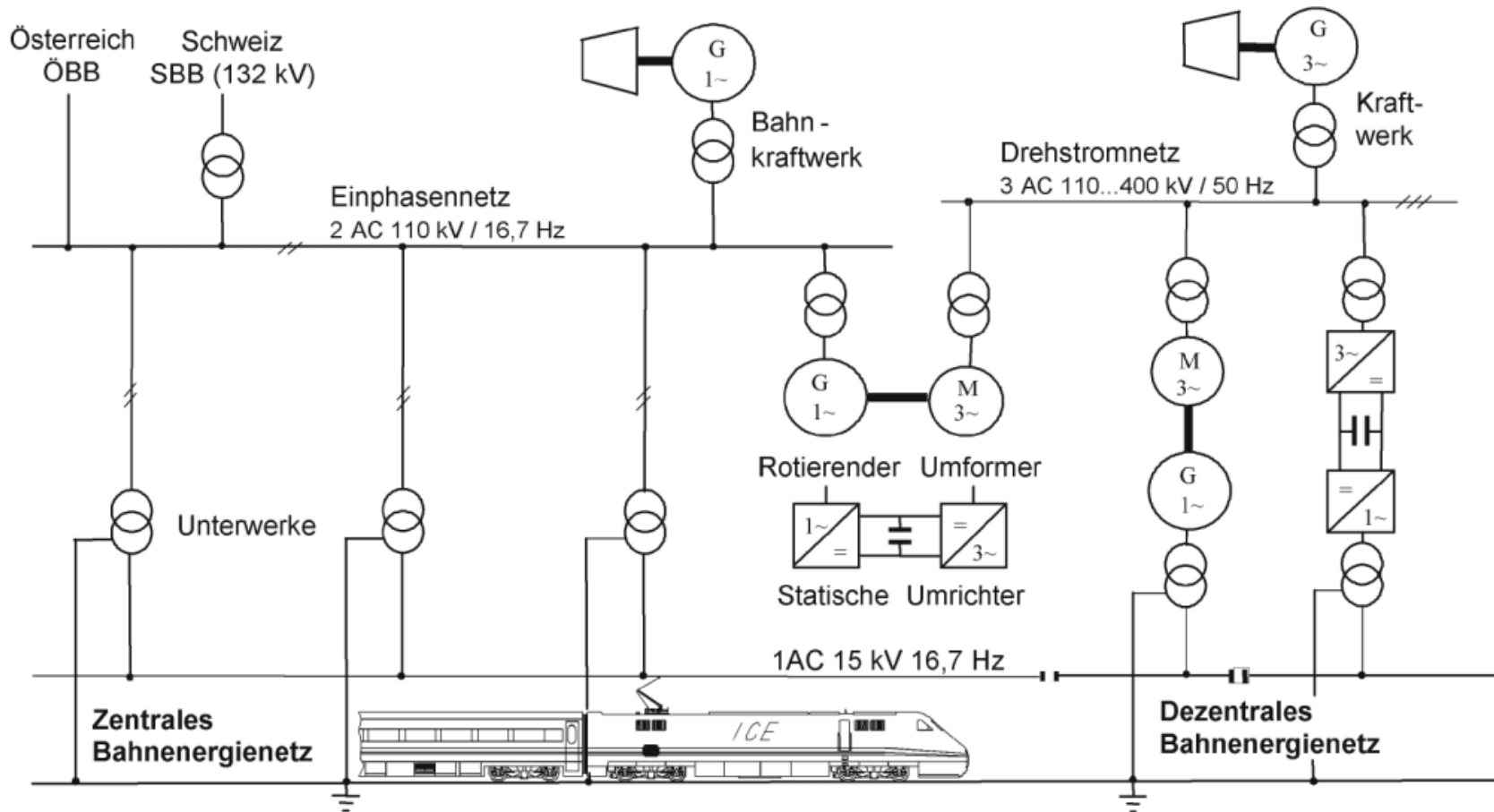


Bild 4.5 Bahnstromversorgung ($U = 15 \text{ kV}$, $f = 16.7 \text{ Hz}$)



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Oberleitungen – Fahrleitung [96]



Bild 4.6 Einfachfahrleitung
keine Schwingungsdämpfung
kostengünstiger



Bild 4.7 Kettenfahrleitung
geringer Belastung des
Stromabnehmers, vermindert Gefahr
des Abhebens bei hohen
Geschwindigkeiten



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Aufbau von Kettenfahrleitungen - Spannfeld:

Fahrdraht (grün)	Höhe 4.9 m bis 6 m (üblich ~5.3 m)	Kupfer-Silber-Legierungen, Kupfer-Magnesium-Legierungen 80 mm ² bis 150 mm ²
Tragseil (blau)	Systemhöhe 0,9m (z.B. Tunnel) bis 2,5 m (z.B. Fahrleitung ohne automatische Nachspannung)	Ähnlich Fahrdraht um gleiche Temperatureigenschaften zu erhalten, bzw. NiRoStahl, Bronze
Hänger (rot)	Abstand ~ 6 m – 12 m (abhängig von max. Geschwindigkeit)	Bronzeseile

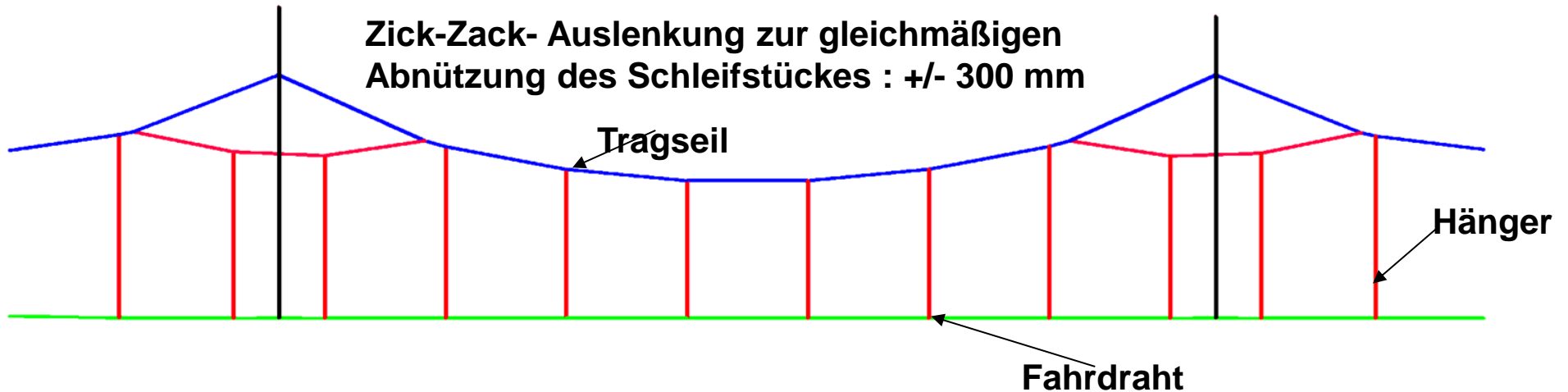
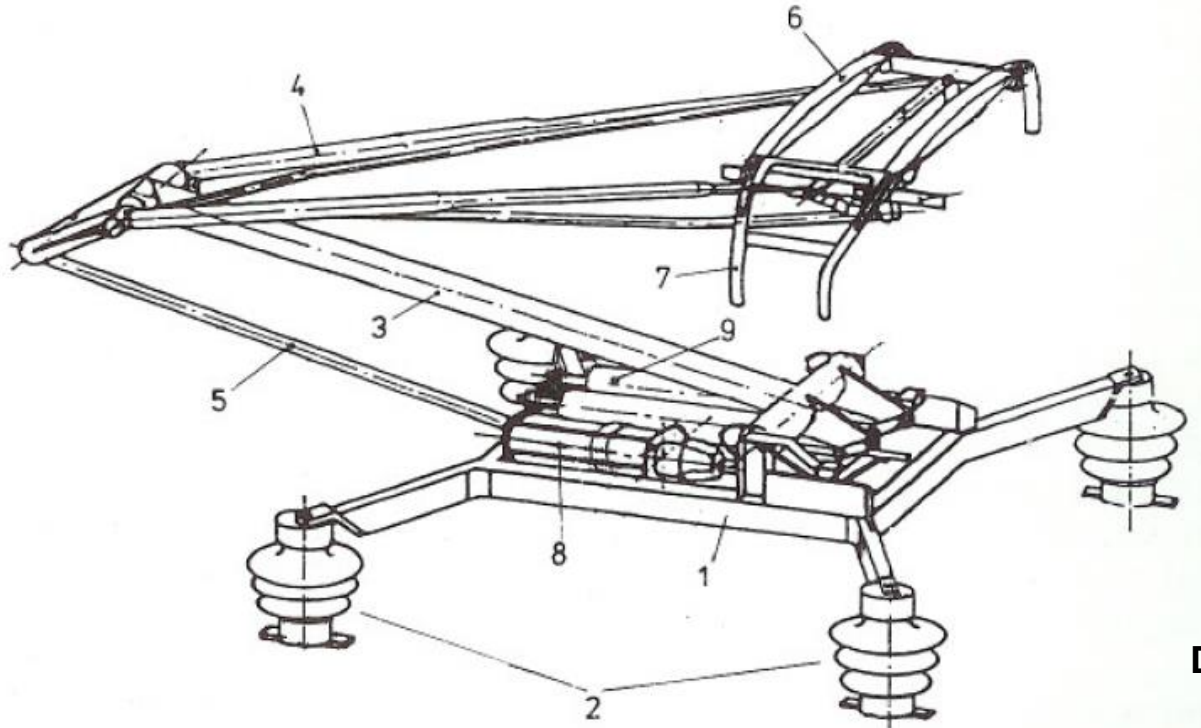


Bild 4.8 Aufbau einer Kettenfahrleitung

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.3 Stromabnehmer



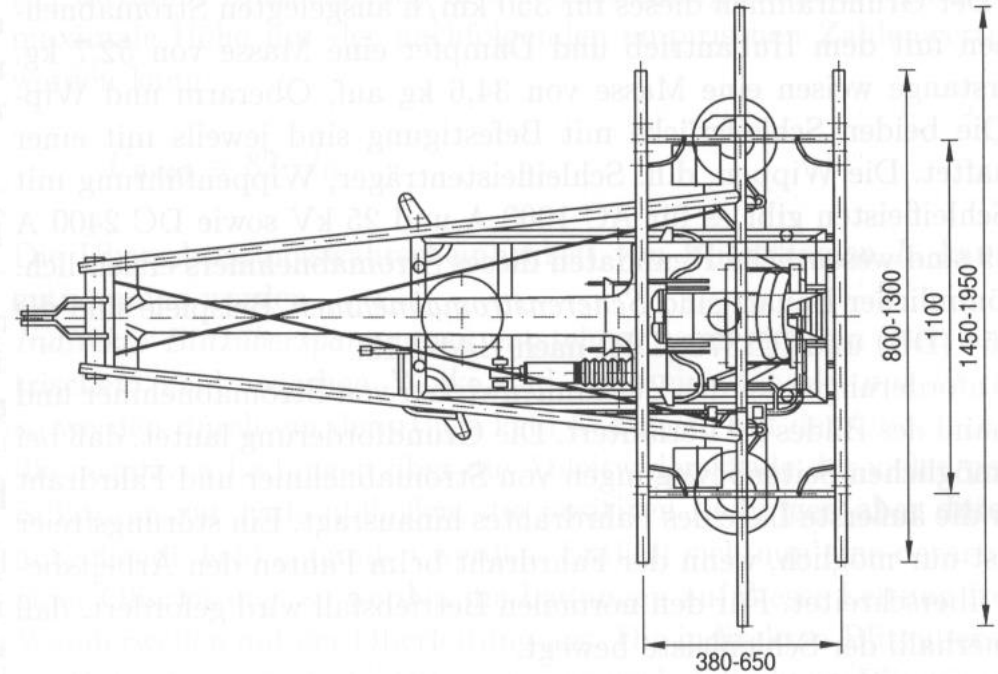
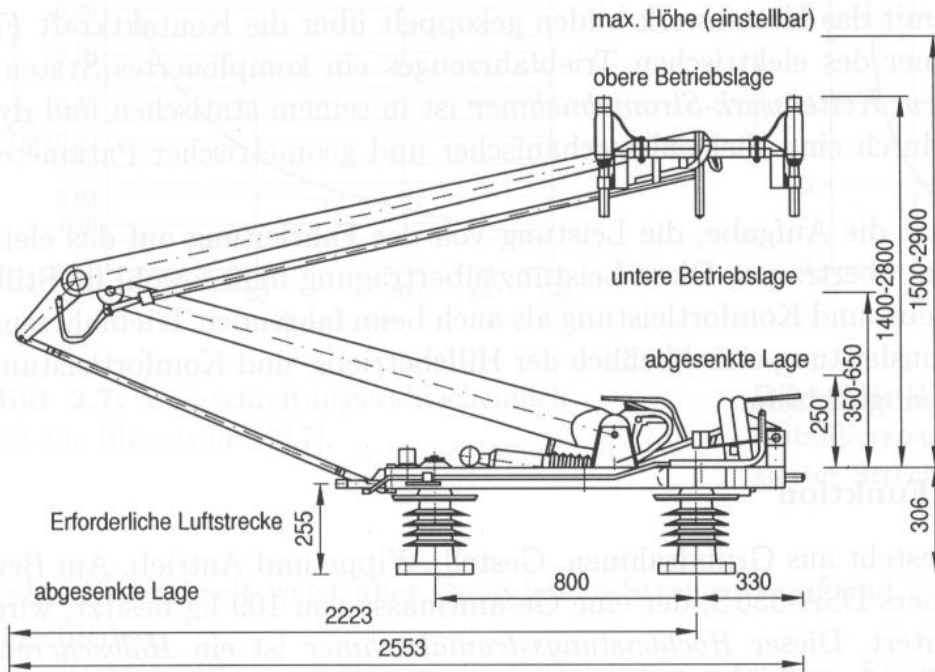
- 1 Grundrahmen
- 2 Stützisolator
- 3 Unterarm
- 4 Oberarm
- 5 Kuppelstange
- 6 Schleifstück
- 7 Auflaufhorn
- 8 Senkantrieb
- 9 Hubfeder

Druckkraft auf Fahrdrabt: ca. 60N

Laufleistung für Kohleschleifstück: 80.000 - 100.000 km, Lebensdauer Fahrdrabt: 30 - 40 Jahre

Bild 4.9 Einholmstromabnehmer [77]

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



Auslegungsgeschwindigkeit 350km/h
Energieübertragung 25kV/ 1000A
Fahrdrahtanpreßkraft 50 - 140 N
Hubantrieb Druckluft
Nenndruck bei 70N Anpreßkraft 3,4 bar

Schleifleiste Al-Träger/Hartkohle
Laufleistung bei 250 km/h 100 000 km
Einzelfederweg der Schleifleisten 40 - 60 mm
Masse 109 kg
Werkstoff: Grundrahmen rostfreier Stahl
sonstige Bauteile Alu- Legierung








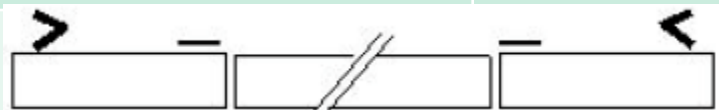
Bild 4.10 Stromabnehmer DSA-350 S [77] (AEG)



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Benutzungsrichtlinien der Stromabnehmer (DB AG) [15]

Fahrtrichtung 

Einfachtraktion	Tfz mit 2 DB SA		
	Multisystem Tfz mit nur einem SA		oder 
	Wenn hinten dem Tfz <ul style="list-style-type: none"> • Wagen mit offenliegenden Gütern • Kessel, Behälterwagen • Tfz im Schleppbetrieb 		oder wenn SA gestört, oder Multisystem TFz mit nur einem SA
	Wenn starker Raufreifbildung und/oder Eis, ggf. mit Zugkraftunterbrechungen oder /und Hauptschalterauslösung		$v_{\max} = 100 \text{ km/h}$
Doppeltraktion	2 Arbeitende Tfz		$v_{\max} = 140 \text{ km/h}$
	Wenn hinten dem Tfz <ul style="list-style-type: none"> • Wagen mit offen liegenden Gütern • Steuer, Kessel, Behälterwagen • Tfz • oder hinterer SA gestört 		$v_{\max} = 140 \text{ km/h}$
	Mindest-Abstand zwischen den 2 SA ist 85 m		$v_{\max} = 140 \text{ km/h}$

Tfz: Triebfahrzeug, SA: Stromabnehmer



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

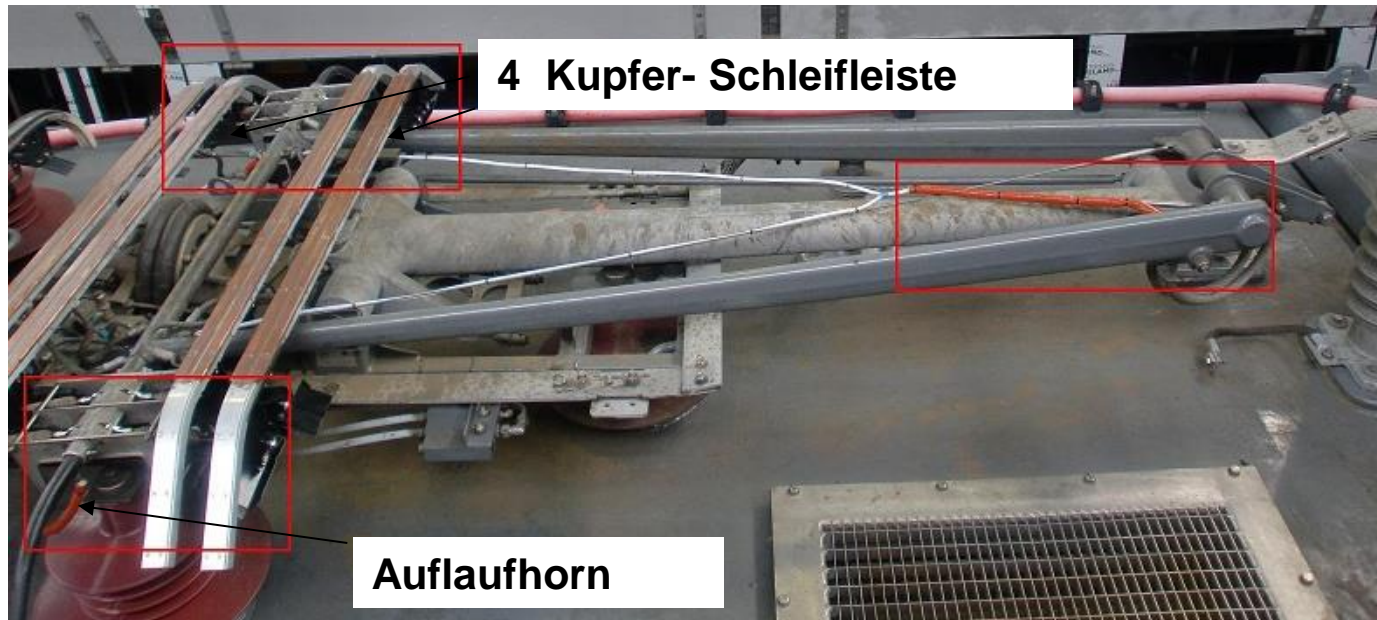
Land	Spannungssystem	Stromabnehmer Höhe in mm	Stromabnehmer Breite in mm	Nutzbreite Schleifstück in mm	Schleifstück Material
Frankreich	SNCF 1,5 kV DC	6500 5500 4600	1950	1000	Kupfer
	SNCF 25 kV AC	6500 5500 4600	1450	800	Kohle, Stahllegierung
Deutschland	DB 15 kV AC	6500 550 4950	1950	1030	Kohle
Österreich	ÖBB 15kV AC	6000 5750 4950	1950	1000	Kohle „dur“
Belgien	SNCB 3kV DC	6250 5300 4800	1760	1000	Kohle, Kupfer, Stahllegierung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Stromabnehmer für Spannungssysteme 1,5 kV DC

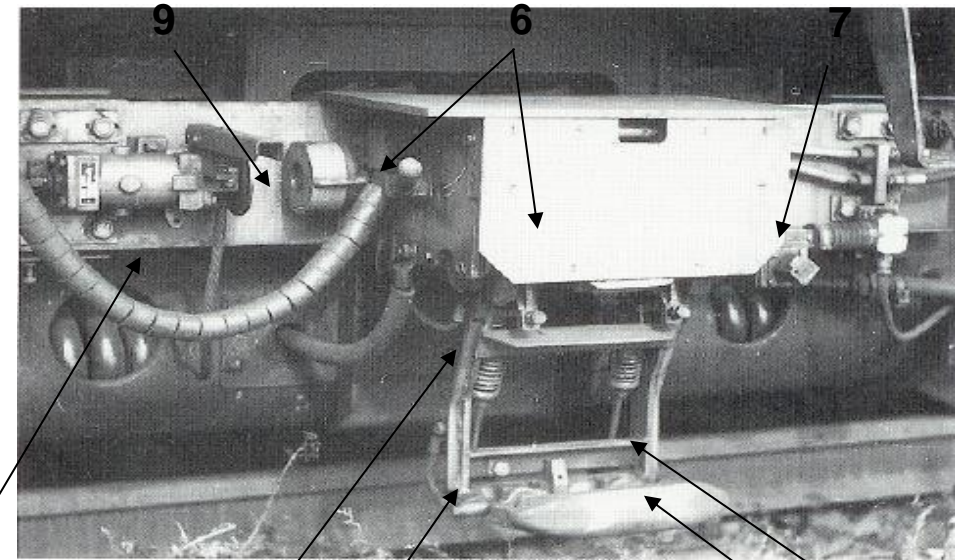
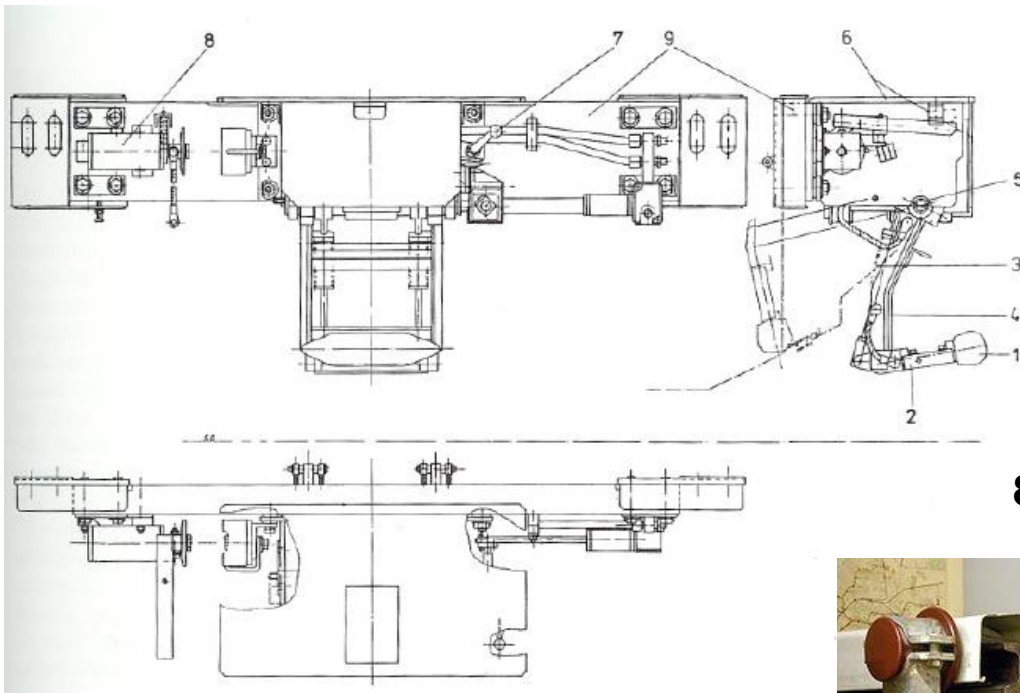
- 4 Kupfer- Schleifleiste
- Pneumatische Betätigung, Hebezeit < 10 s und Senkzeit < 3 s
- Laufleistung 50 000 km, Wartungsintervall 15 000 km
- Anpressdruck 90 N



Quelle: Internet

Bild 4.11 Stromabnehmer 1,5 kV (Stemman)

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge



- 1 Schleifstück
- 2 Schleifstückarm
- 3 Druckfeder
- 4 Stromabnehmerhorn
- 5 Hautwelle
- 6 Isolierstoffplatte
- 7 Kontaktstift für Schuppenanschluß
- 8 Kurzschließer
- 9 Isolierstoff

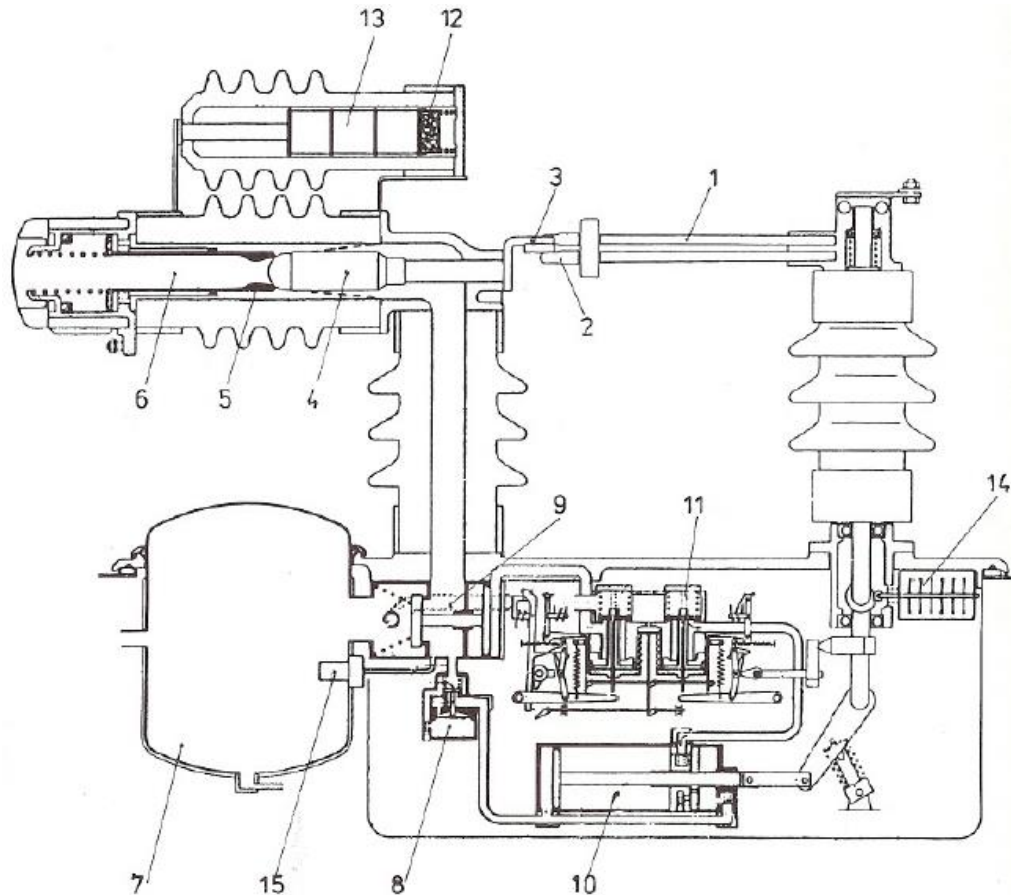
Bild 4.12 Stromabnehmer für 3. Schiene [97]

Gleichstrom - Nahverkehrstriebfahrzeug 1200 - 1500 V



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.4 Hauptschalter



- 1 Trennmesserstab
- 2 Kontaktfinger
- 3 Kontaktbeil
- 4 Festkontakt
- 5 Kontaktdüse
- 6 Löschkammer
- 7 Druckluftbehälter
- 8 Verzögerungsventil
- 9 Hauptventil
- 10 Trennmesserantrieb
- 11 Steuerblock
- 12 Luftentfeuchter
- 13 Widerstand
- 14 Hilfsschalter
- 15 Durchlüftungspatrone

Bild 4.13 DBFT - Schalter (Druckluftschallschalter) [97]

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.5 Transformator

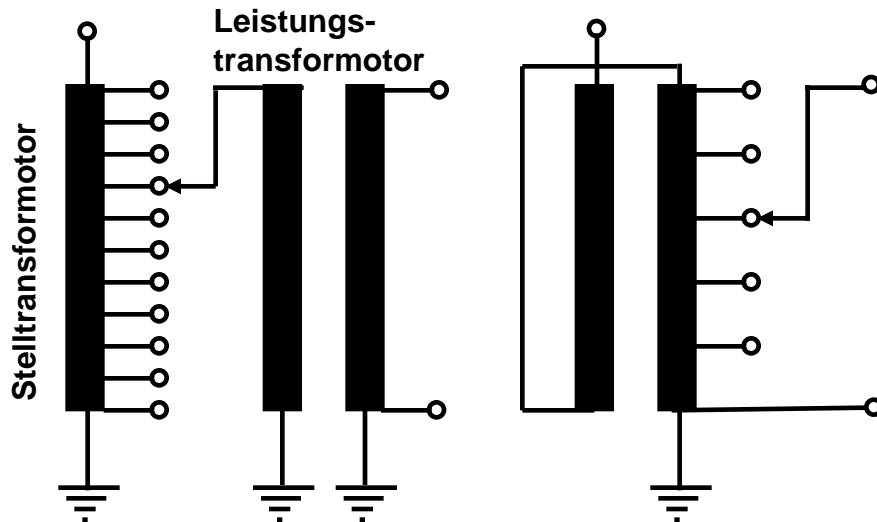


Bild 4.14 Hoch - und Niederspannungssteuerung

Hochspannungssteuerung: 30 - 50 Fahrstufen, I bis ca. 400 A,
Spannungsdifferenz unterschiedlich

Niederspannungssteuerung: 15 - 20 Fahrstufen, I bis ca. 12 000 A,
Spannungsdifferenz konstant

Kurzschlußspannungen:

Konventionellen Tzf : $u_k = 7 - 12\%$

Drehstromtechnik: $u_k = 25 - 30\%$

mechanisch fester Aufbau:

Fahrschütterungen

Belastungen durch Stoßkräfte

Überlastungen

Überspannungen

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Kühlung

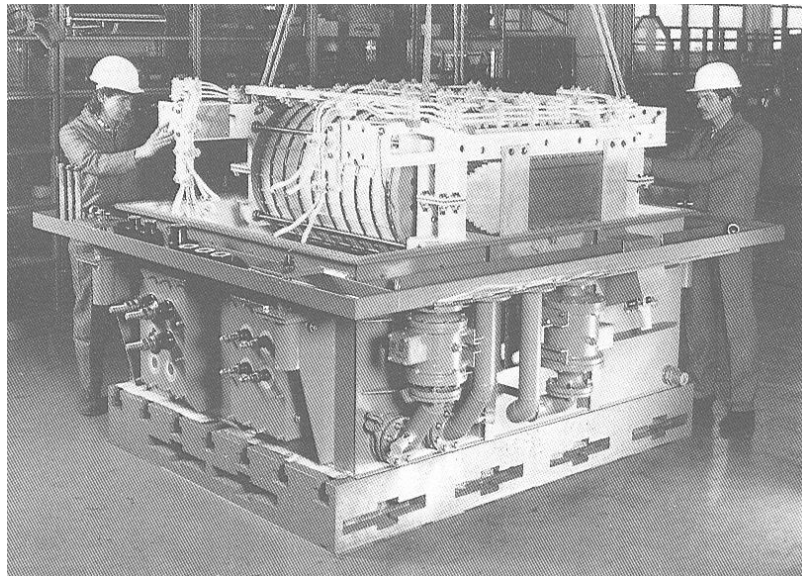
Luftkühlung: nur noch bei alten Triebfahrzeugen

Nachteile: Verschmutzung und Feuchtigkeit

Ölkühlung: bei allen neuen Triebfahrzeugen

Ölzwangsumlauf mit äußerer Fremdkühlung

Vorteile: höhere Wärmekapazität, Isolationsfestigkeit
Schutzwirkung gegen Staub und Feuchtigkeit,
geringere Baugröße und Masse



Nennspannung primär	15 000V
Nennspannung sekundär	4 x 1 432 V Traktion 1011 V Heizung 884 V und 200 V HB
Nennscheinleistung primär	5 220 kVA
Nennscheinleistung sekundär	4 x 1127 kVA 500 kVA Heizung 176 kVA und 36 kVA HB
Masse	10 000 kg

Bild 4.15 Transformator Unterflurbauweise mit Ölkühlung [15]



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.6 Leistungssteuerung (siehe Kapitel 5)

Gleichstrommaschine GSM:

- Gruppenschaltung der GSM
- Choppersteuerung (Gleichstromsteller)

Asynchronmaschine ASM:

- U-WR
- J-WR

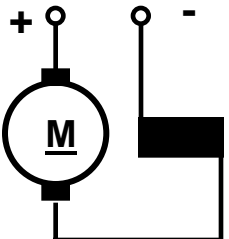
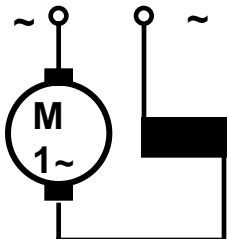
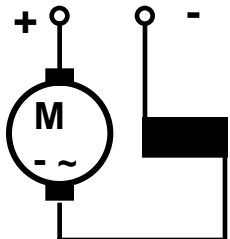
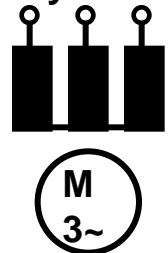
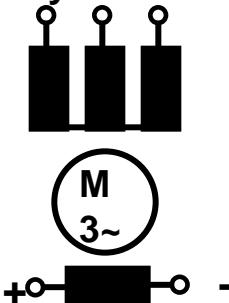
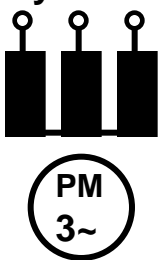
Synchronmaschine SM (PSM+ESM)

- U-WR mit spezieller I_d - und I_q -Regelung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.7 Traktionsmaschinen (siehe Kapitel 6)

Bauart motor	Gleichstrom-Reihenschluss	Wechselstrom-Reihenschluss	Mischstrom-Reihenschluss	Drehstrom-asynchron	Drehstrom-Synchron	PM-Synchron
Grundschaltung						
Schleifkontakte	Kommutator	Kommutator	Kommutator	keine	Schleifringe	keine
Direktspesung	möglich	ja	nein	nein	nein	nein
Steuerung	Widerstände + Schaltwerk Chopper	Transformator + Schaltwerk	Transformator + Schaltwerk + Diodenbrücke Transformator + Thyristorbrücke	Umrichter	Umrichter	Umrichter



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.8 Widerstände

Haupteinsatzgebiete

- Anfahrwiderstände für Gleichstromtriebfahrzeuge
- Bremswiderstände für elektr. Widerstandsbremse
- Heizwiderstände für Führerkabine und Fahrgasträume
- Lade- und Entladewiderstände für Kondensatoren
- Lade- und Begrenzungswiderstände für Batterien

Anforderungen an die Werkstoffe

- hoher spezifischer Widerstand zur Erzielung geringer Massen
- hohe zulässige Arbeitstemperatur
- kleiner Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstandes
- gute technologische Herstelleigenschaften, Löt- und Schweißbarkeit
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- geringe Wärmedehnung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Widerstände

Werkstoffe

- Metalllegierungen: Eisen, Chrom, Nickel, Kupfer, Aluminium, Mangan, Kobalt
spezifischer Widerstand: $0,2 - 0,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- Speziallegierungen: (Kanthal, Akrothal) spezifischer Widerstand: $> 1,2 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Aufbau

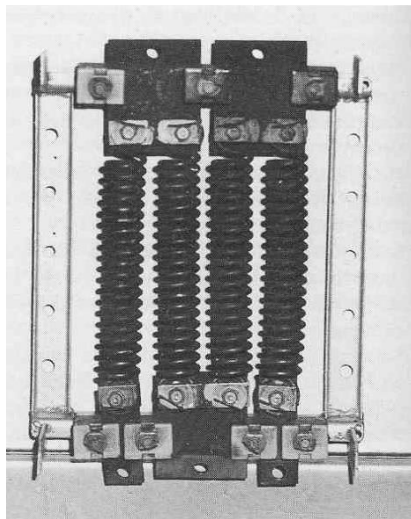
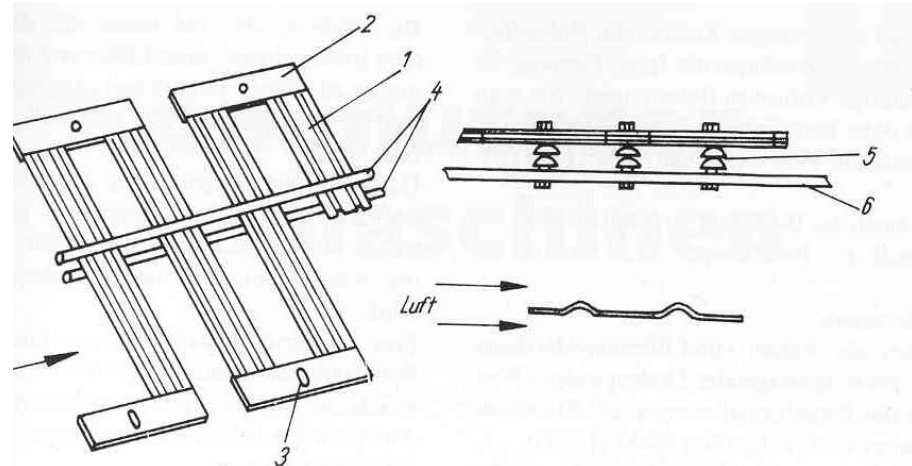


Bild 4.16 Drahtwiderstand [77]



- 1 gesicktes Widerstandsband
- 2 Verbindungsflasche
- 3 Langloch (Wärmeausdehnung)
- 4 Isolatorstäbe
- 5 Isolatoren
- 6 Traggerüste

Bild 4.17 Bandwiderstand [77]

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.9 Stromrückführungen

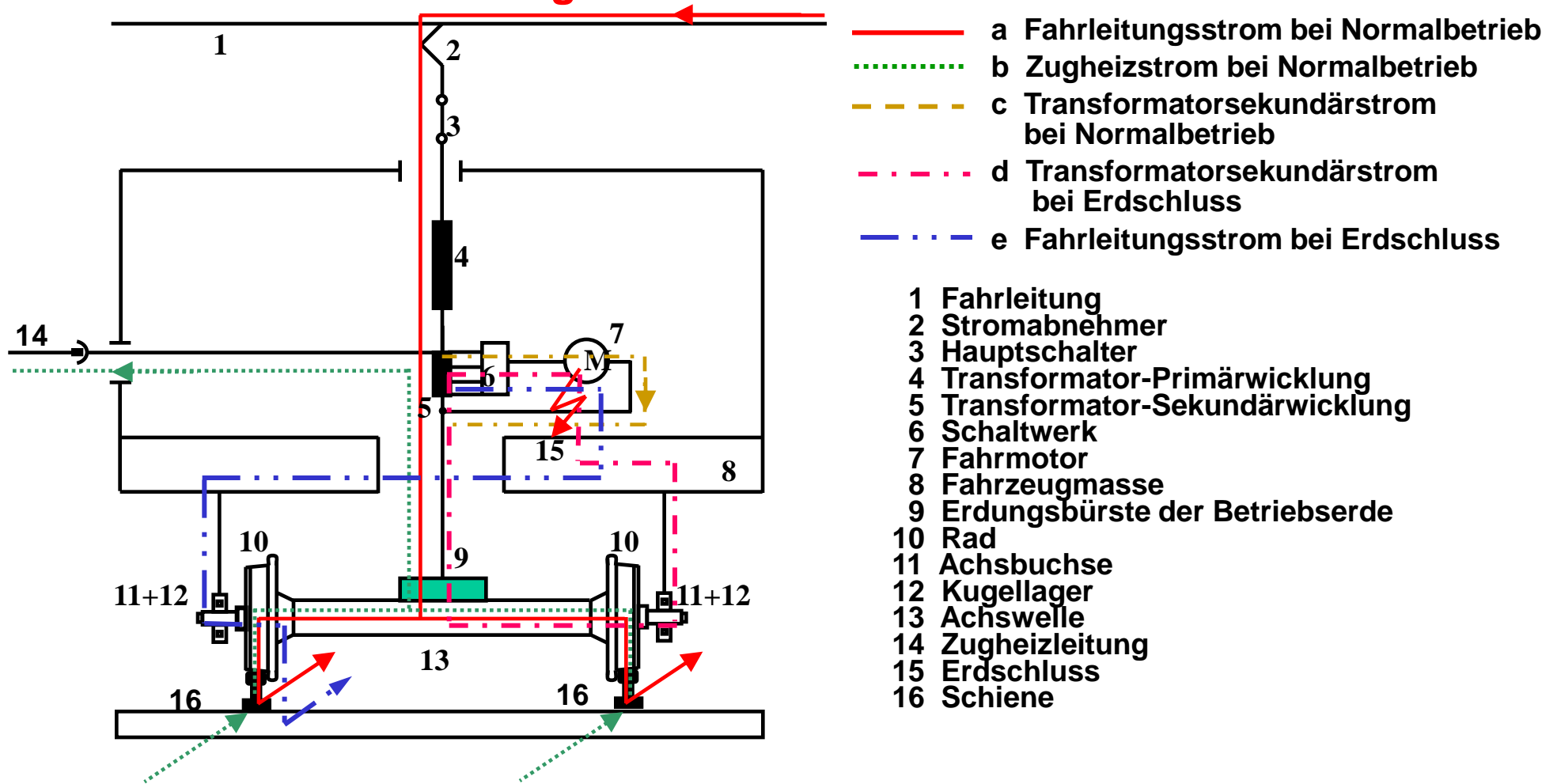


Bild 4.18 Verlauf des Stromes bei getrennter Betriebs- und Schutz Erde [96]



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

4.10 Magnetschwebebahn

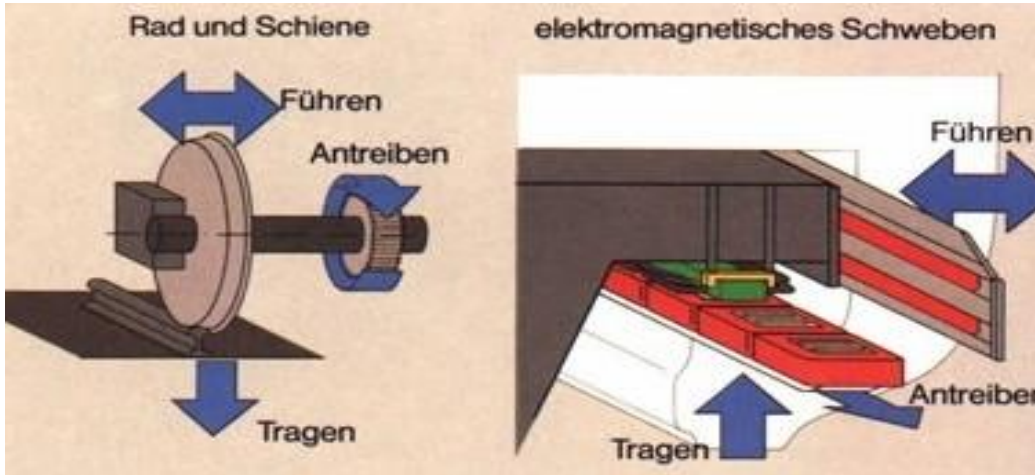


Bild 4.19 Gegenübergestellte Aufgabenverteilung; rechts Transrapid mit seitlichem Führmagnet (rot), unterem Tragemagnet (rot) und fahrwegseitigem Langstator (grün) mit integrierter Wanderfeldwicklung

Quelle: Transrapid/Thyssen-Krupp, Deutschland

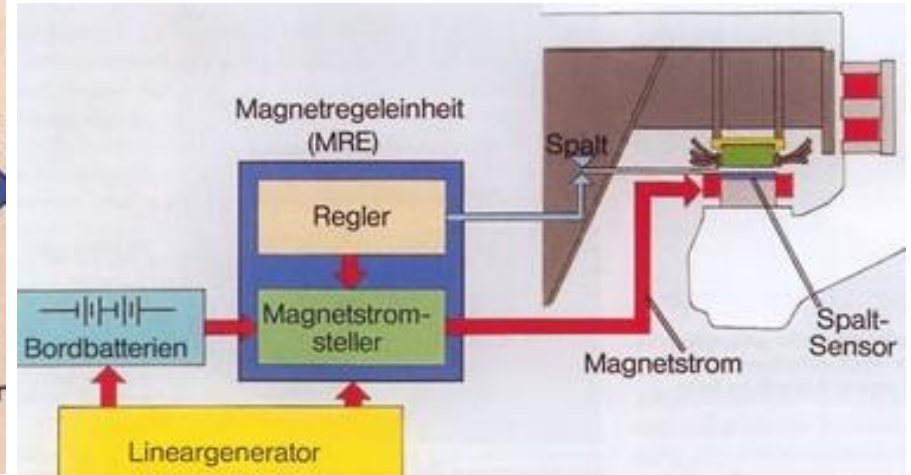


Bild 4.20 Ein fahrzeugseitiges elektronisches Regelsystem ermöglicht einen ununterbrochenen Schwebезustand und wird über Lineargeneratoren mit Energie versorgt

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Quelle: Transrapid/Thyssen-Krupp, Deutschland

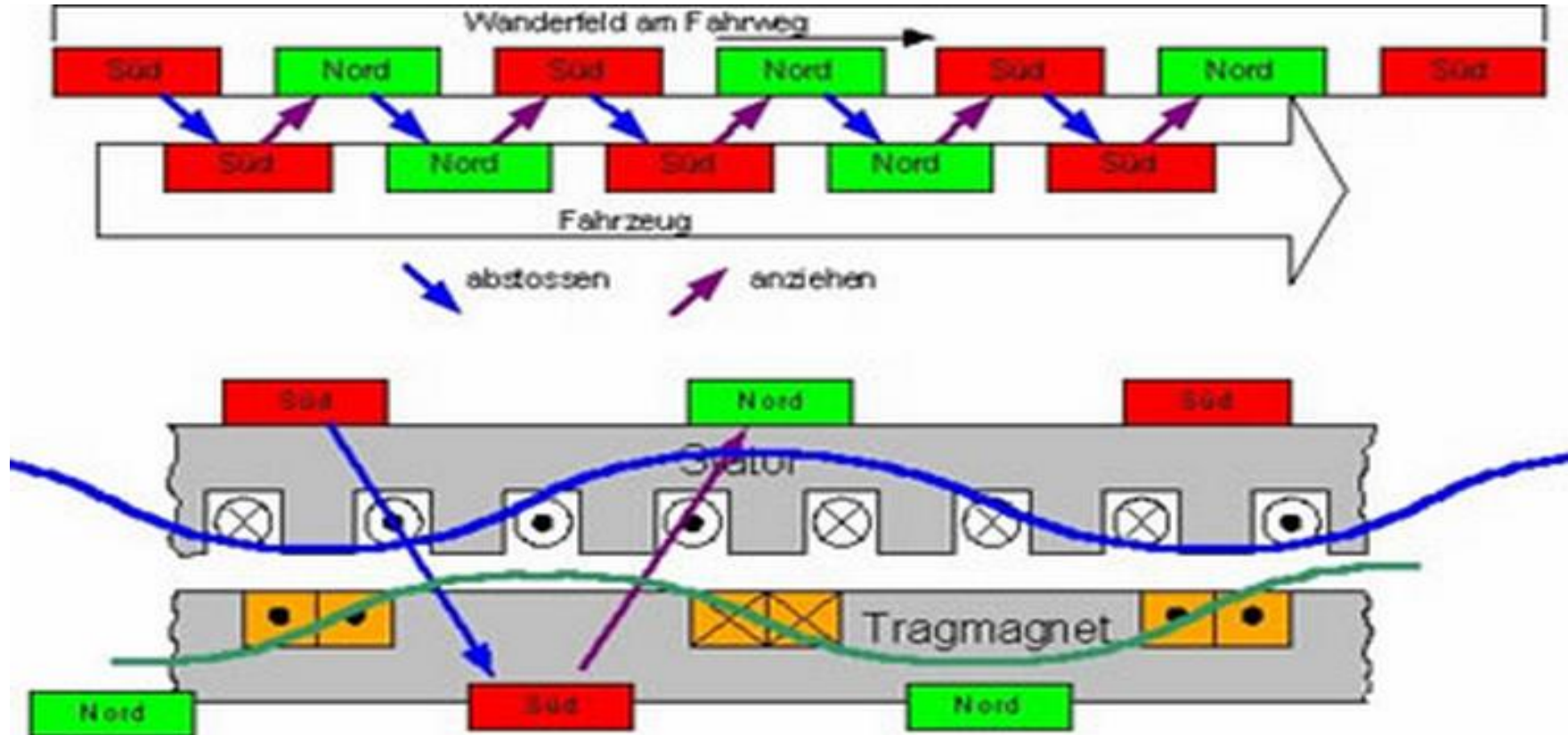


Bild 4.21 Vereinfachte Skizze zur Funktionsweise des Linearantriebs; der Drehstrom erzeugt magnetische Felder, deren Kräfte die fahrzeugseitigen Tragmagnetpole kontinuierlich in eine Richtung in Bewegung bringen

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

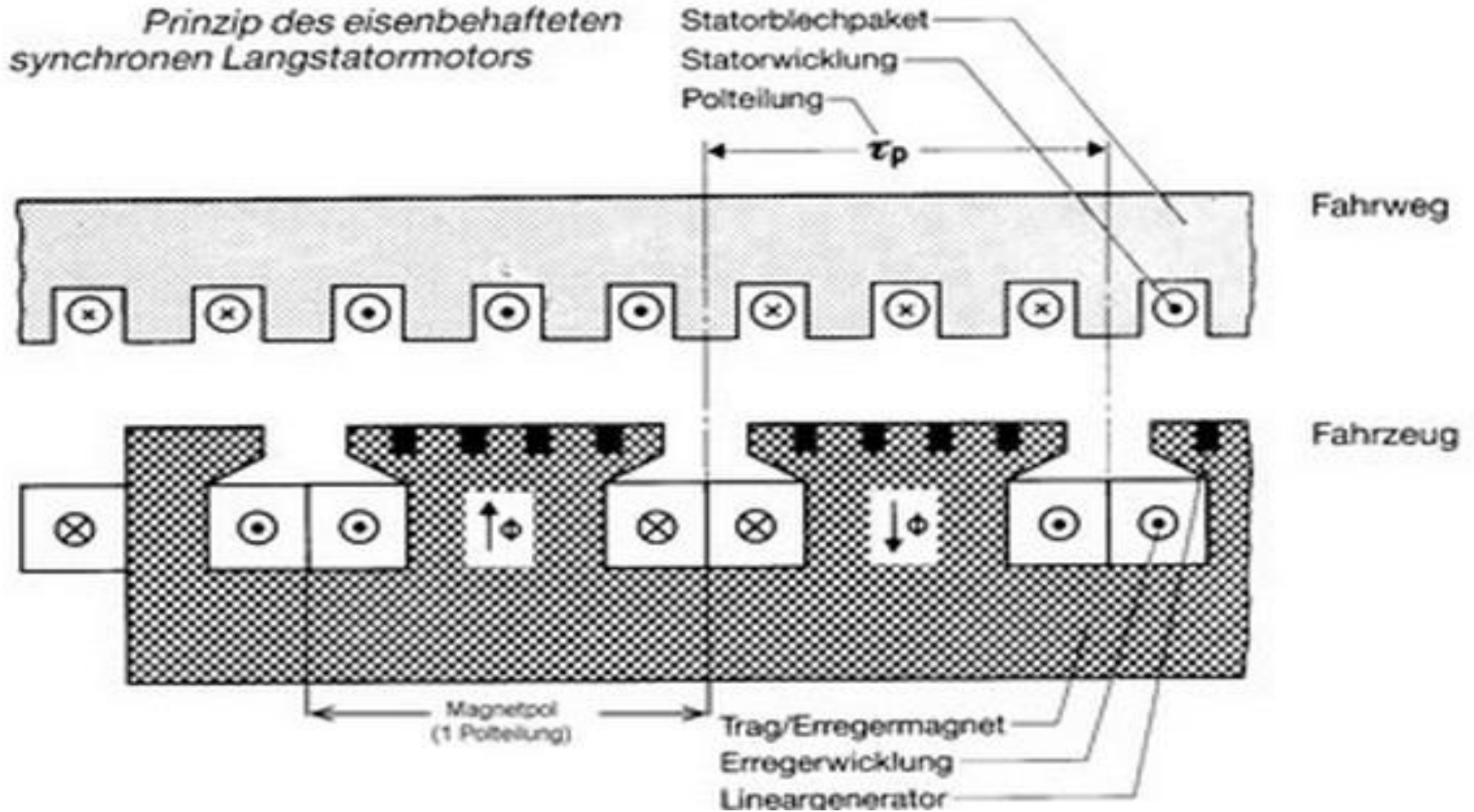


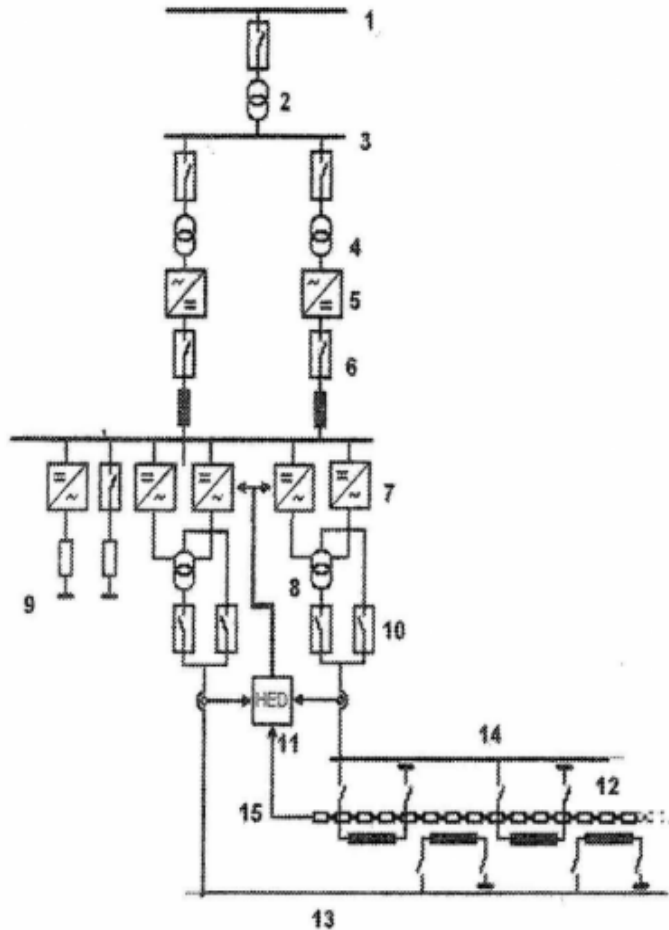
Bild 4.22 Synchron- Langstator und Erregermagnete in der Längsansicht

Quelle: PhD Thesis Dr. Fürst, TU Berlin



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Quelle: PhD Thesis Dr. Fürst, TU Berlin



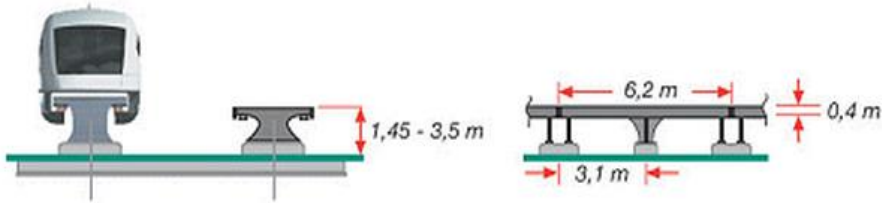
- 1 Landes – Netz 110kV
- 2 Hochspannungstransformator 110/20kV
- 3 Sammelschiene 20kV
- 4 Stromrichtertransformatoren
- 5 Gleichrichter
- 6 Gleichstromschnellschalter
- 7 Wechselrichtergruppen I u. II
- 8 Ausgangstransformatoren
- 9 Bremssteller und Bremswiderstand
- 10 Ausgangsschalter
- 11 Regelung
- 12 Fahrzeuglageerfassung
- 13 Streckenkabel I
- 14 Streckenkabel II
- 15 Längsstatorwicklung

Bild 4.23 Prinzipschaltbild der Leistungssteuerung und der Leittechnik



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Ebenerdiger Fahrweg



Quelle: Transrapid/Thyssen-Krupp, Deutschland

Aufgeständerter Fahrweg

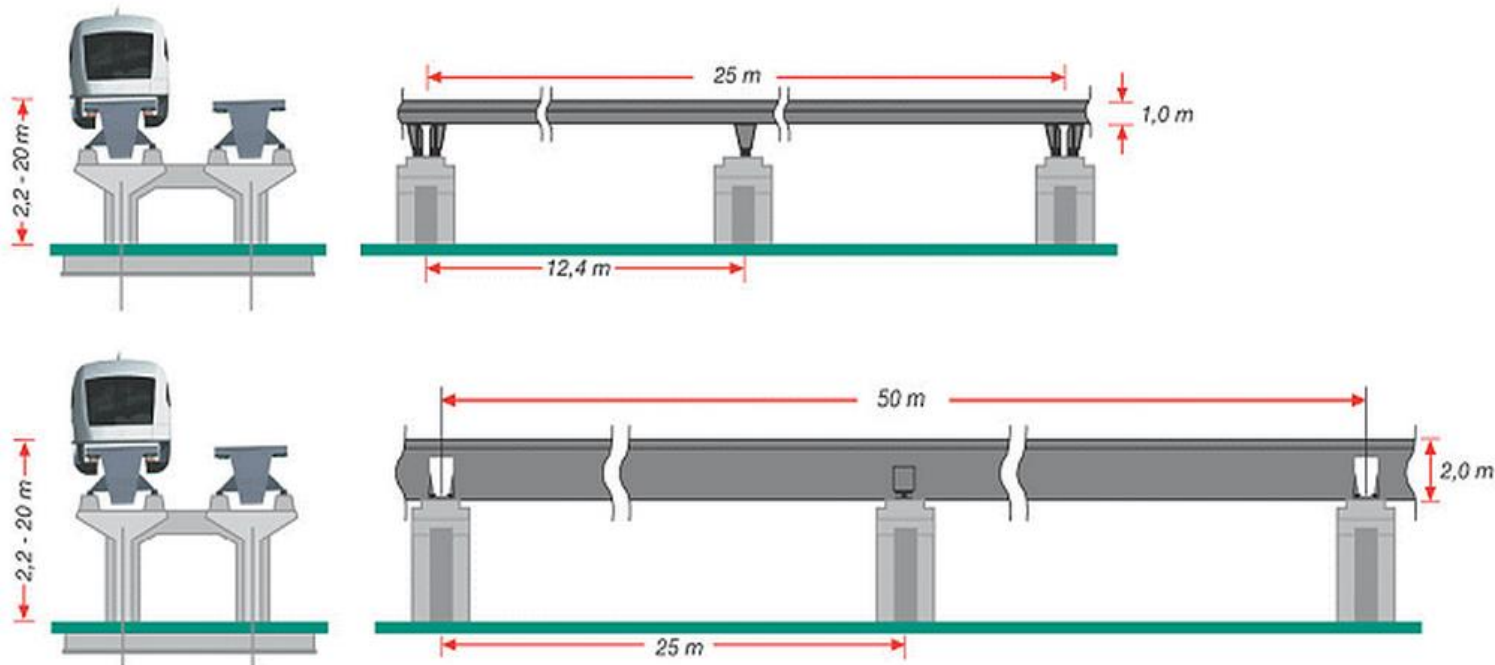


Bild 4.24 Ebenerdiger und aufgeständerter Fahrweg



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Quelle: Transrapid/Thyssen-Krupp, Deutschland

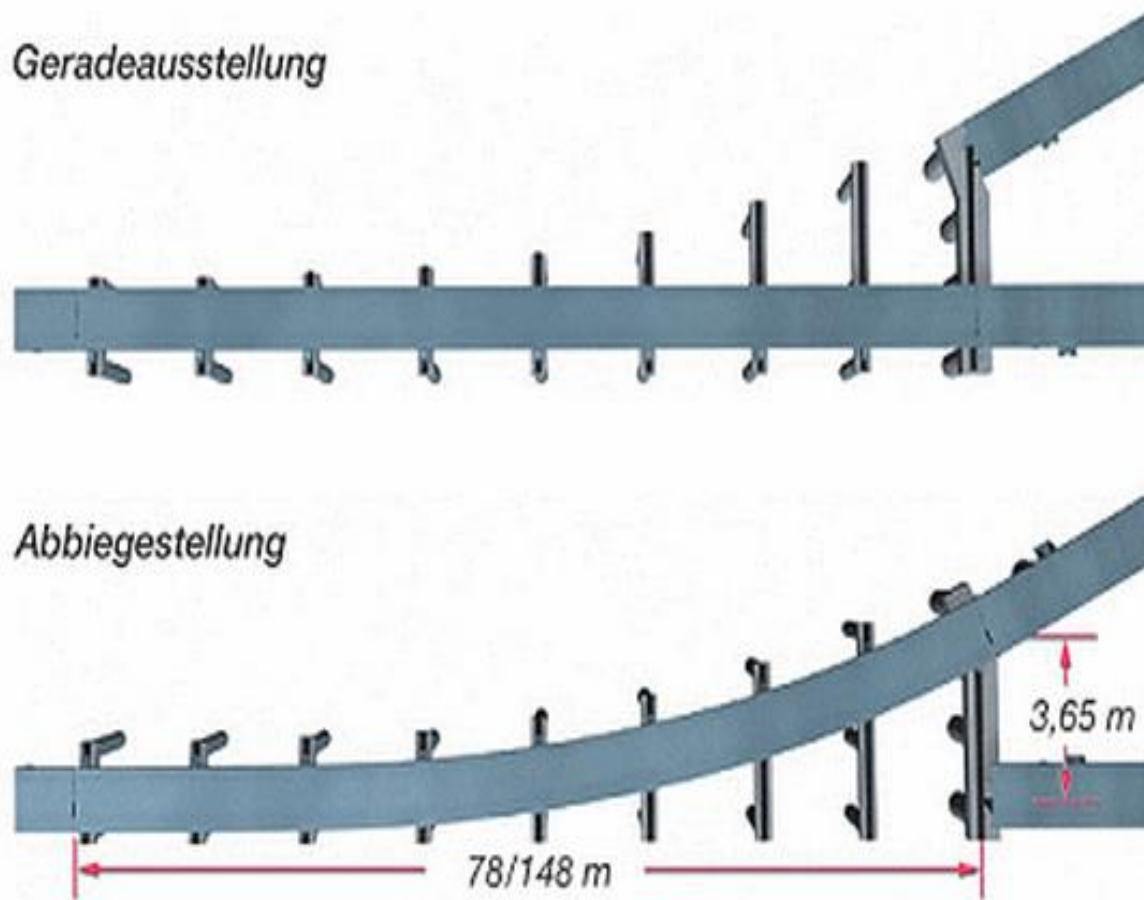


Bild 4. 25 Fahrweg: Geradeaus - und Abbiegestellung



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Elektrodynamisches Schweben

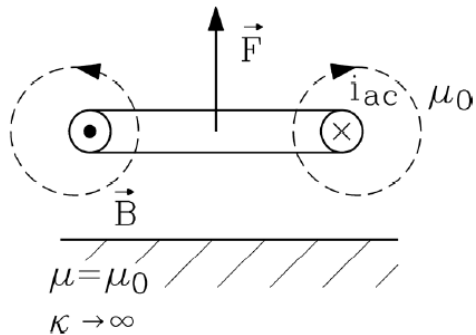


Bild 4.26 Leiterschleife über nicht-magnetisierbarem, ideal leitendem Material [98]

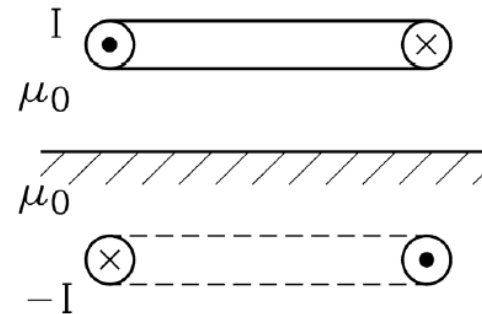


Bild 4.27 Kraftberechnung mittel Spiegelmethode [98]

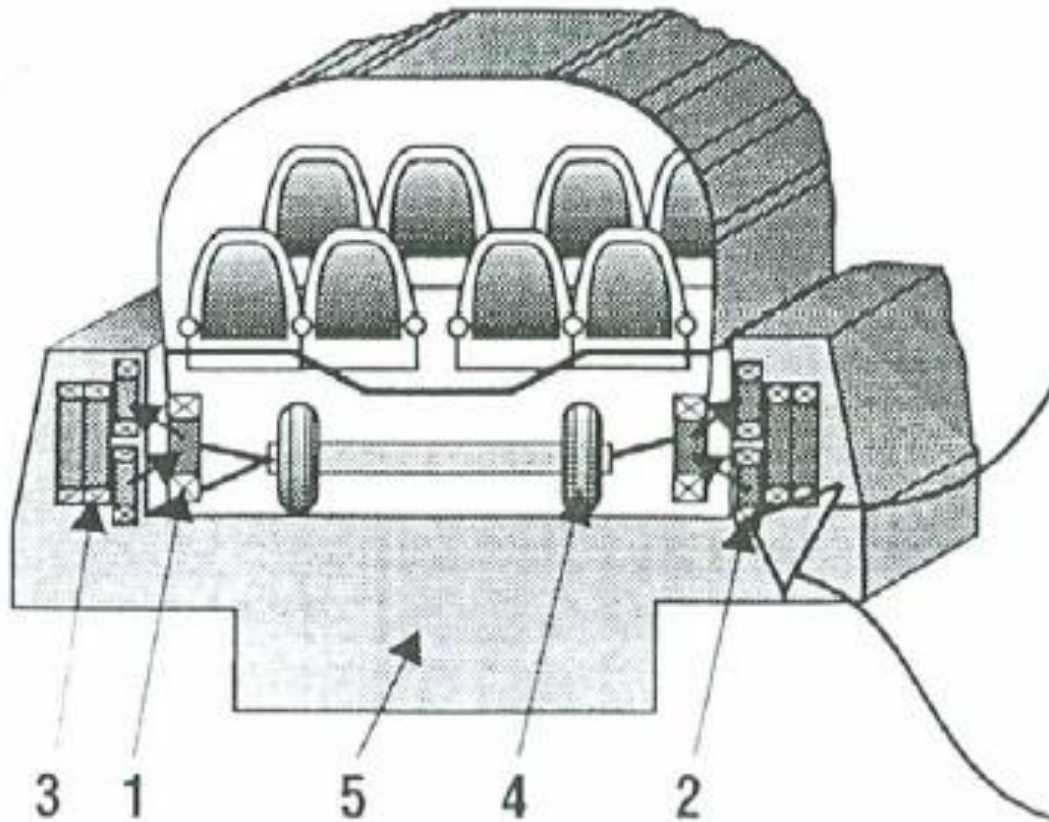
Probleme in der Ausführung

- Magnetische Flussdichten über 5 T
 - Einsatz von Eisen als Joch unmöglich
 - Abschirmung des Wageninneren und Schleusen an den Haltestellen
- Supraleitende Spulen für Magnetfelder nötig
 - Thermische Schirmung (Kryostate)
 - Kälteanlagen

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Funktionsprinzip

- Spulensystem im Fahrweg verantwortlich für elektrodynamisches Schweben und Spurführung
 - Tragrollen bei Geschwindigkeiten unterhalb der Take-Off-Geschwindigkeit (ca. 150 km/h)
 - Antrieb durch Synchronlinearmotor
- Differenzgeschwindigkeiten bei Begegnungsfahrten > 1000 km/h



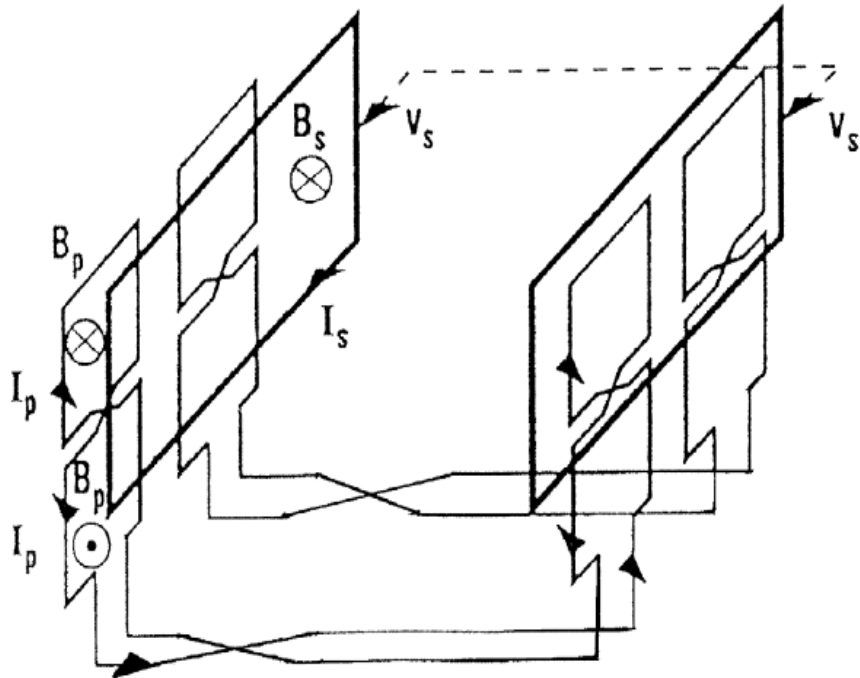
- 1 **Supraleitermagnete** Komarek, P.: Teubner, Stuttgart, 1995
- 2 **Achterspulen“**
- 3 **Linear-Langstator**
- 4 **Räder für niedrige Geschwindigkeiten**
- 5 **Fahrweg**

Bild 4.28 Schnittbild



4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Nullflussanordnung Schweben



Komarek, P.: Teubner, Stuttgart, 1995

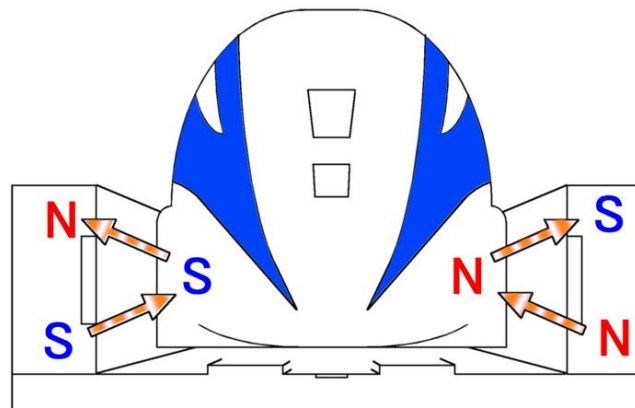
Bild 4.29 Nullflussanordnung

Vertikal mittige Lage:

- Totale Flussverkettung der Achterspulen = 0
- Keine induzierte Spannung
- Keine resultierende Kraft

Absenkung aufgrund Gewichtskraft:

- Resultierende Flussverkettung erzeugt magnetische Kraft
- Kraft der Ursache entgegengesetzt (Lenz'sche Regel)

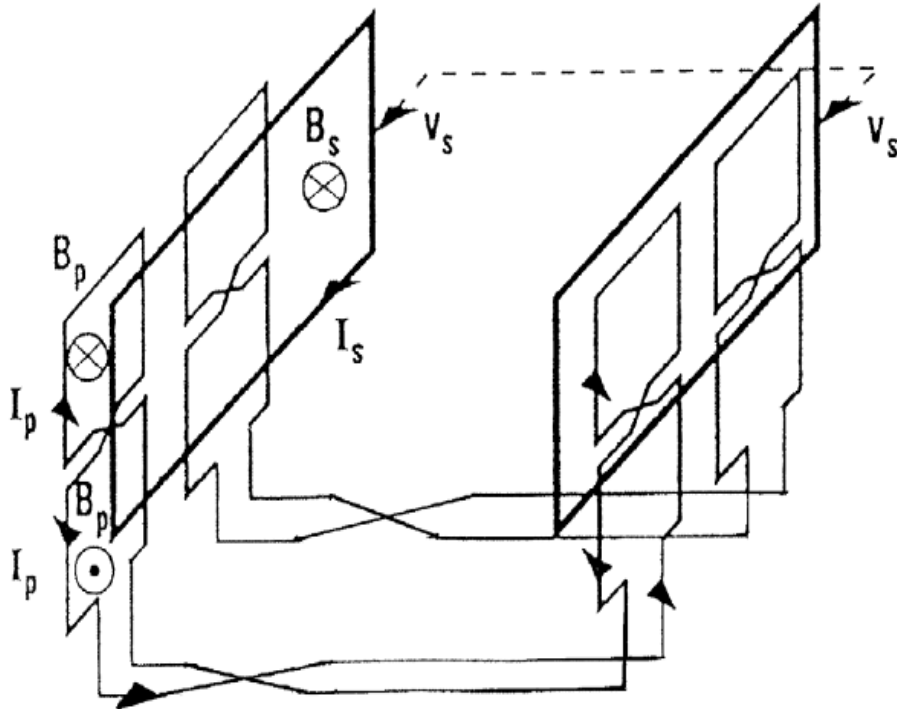


Quelle: Internet

Bild 4.30 Magnetische Kräfte erzeugen Schwebefeffekt

4 Elektrischer Teil elektrischer Triebfahrzeuge

Nullflussanordnung Spurführung



Komarek, P.: Teubner, Stuttgart, 1995

Bild 4.31 Nullflussanordnung

Position in Fahrwegmitte:

- Flussverkettung der Spulen links und rechts hebt sich auf
- keine Kraftwirkung

Seitliche Verschiebung:

- Verringerung der Abstände
- Resultierende Flussverkettung erzeugt magnetische Kraft
- Kraft der Ursache entgegengesetzt (Lenz'sche Regel)

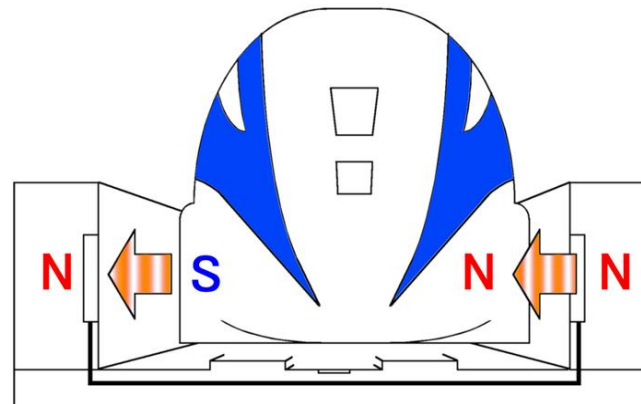


Bild 4.32 Magnetische Kräfte bei seitliche Verschiebung

Quelle: Internet

5 Leistungssteuerung

- 5.1 Leistungssteuerung - Varianten
- 5.2 Elektronische Leistungselemente
- 5.3 Leistungssteuerung bei Gleichstromtriebfahrzeugen
- 5.4 Leistungssteuerung bei Wechselstromtriebfahrzeugen
- 5.5 Rekuperation, Netzurückwirkungen



5 Leistungssteuerung

5.1 Leistungssteuerung - Varianten

- - konventionelle Technik
- neue, bewährte Technik
- neue Entwicklungen

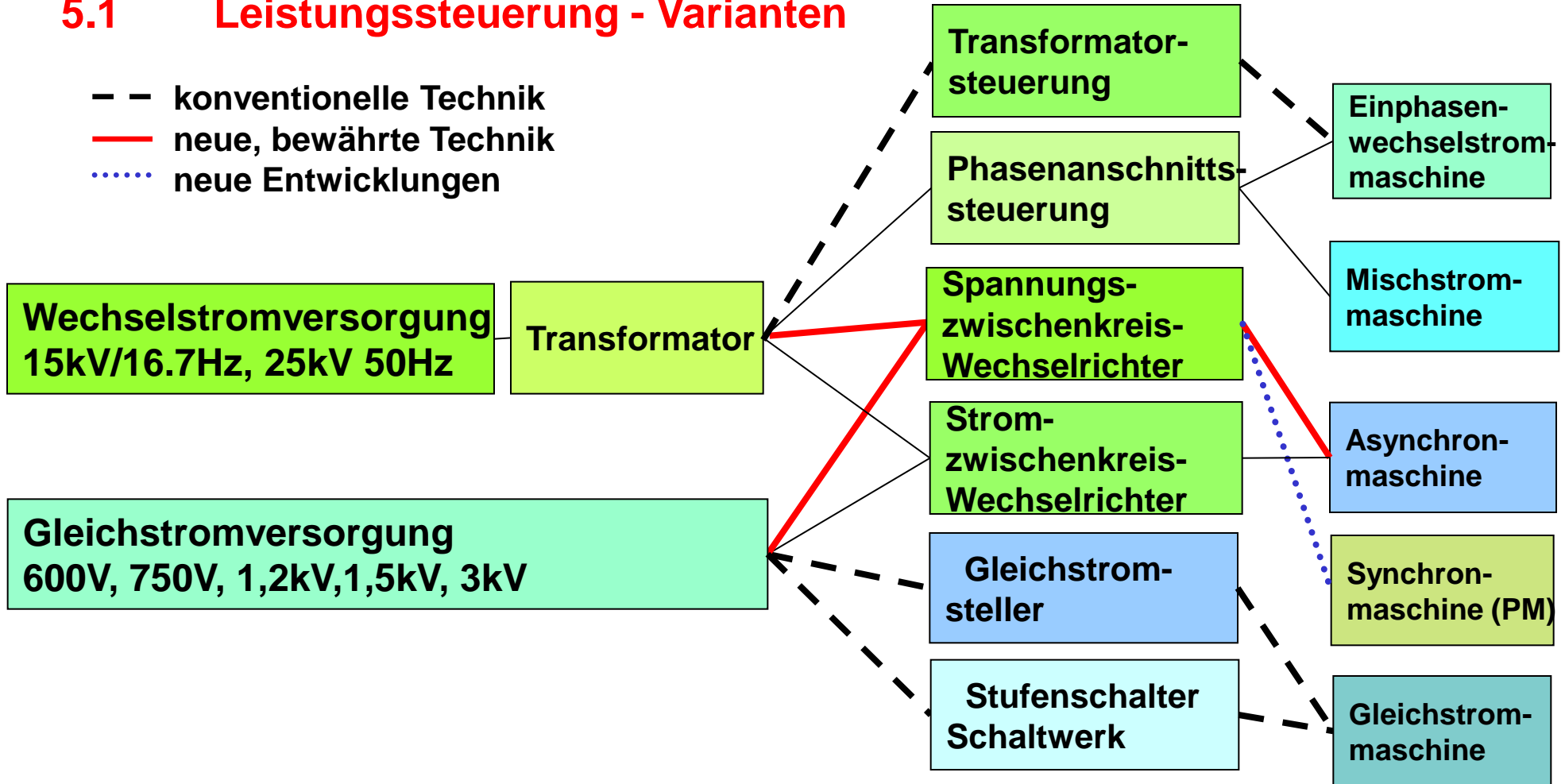


Bild 5.1 Leistungssteuerung für Traktionsmaschinen



5 Leistungssteuerung

5.2 Elektronische Leistungsbaulemente

Diode

PN- Übergang, 2 Anschlüsse,

Gleichrichter

Transistor - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

PNP -oder NPN -Übergänge, 3 Anschlüsse: Emitter, Kollektor, Basis
steuerbarer Widerstand, Verstärker

Thyristor - GTO (Gate-Turn-Off)

PNPN oder NPNP- Übergänge, 3 Anschlüsse, Anode, Kathode, Gate

elektronischer Schalter Thyristor: nur Einschalten, GTO: Ein- und Ausschalten



5 Leistungssteuerung

5.3 Leistungssteuerung bei Gleichstromtriebfahrzeugen

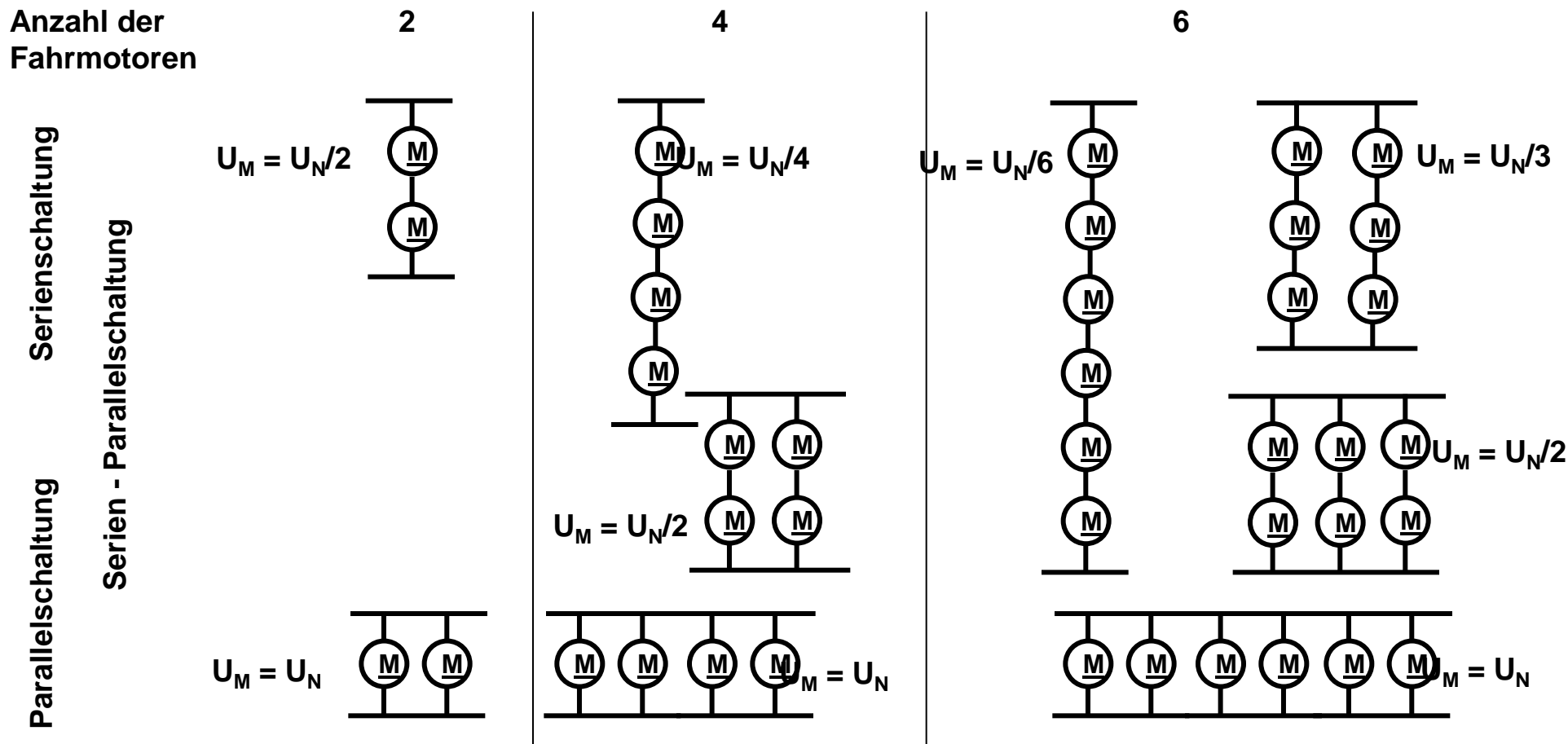
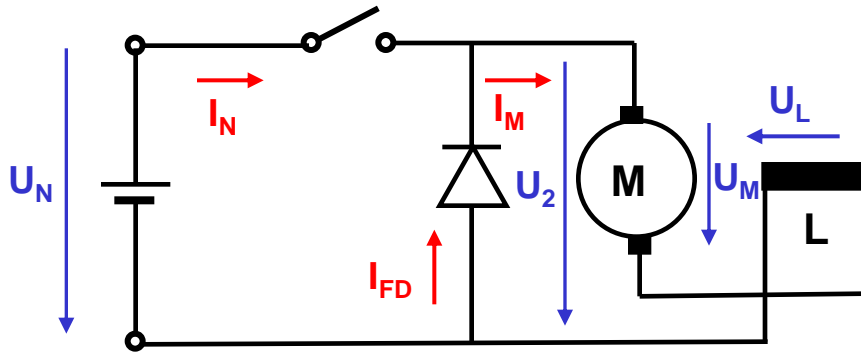


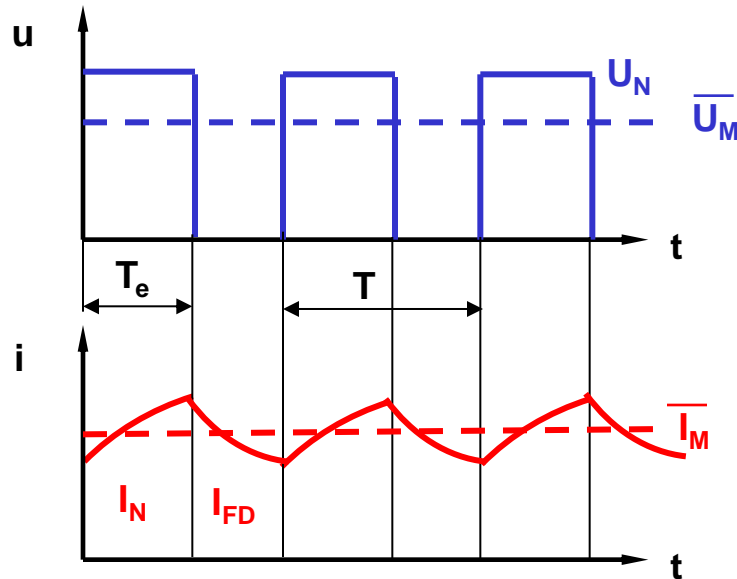
Bild 5.2 Gruppierungsschaltungen für Gleichstromtriebfahrzeuge



5 Leistungssteuerung



$$u_M = \frac{U_N \cdot T_e}{T} = a \cdot U_N \quad a = \frac{T_e}{T}$$



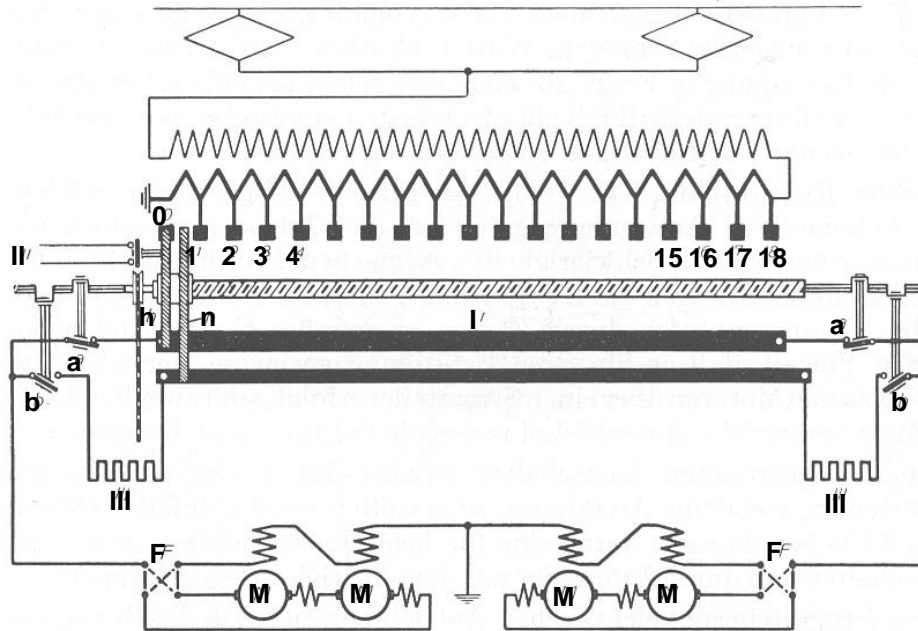
I_{FD} Strom über Freilaufdiode verhindert das Lücken des Stromes
 L Induktivität der Feldwicklung

Bild 5.3 Grundschtaltung eines Gleichstromstellers (Chopper)



5 Leistungssteuerung

5.4 Leistungssteuerung bei Wechselstromtriebfahrzeugen



- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| I Haupt- u. Hilfsschiene | h,n Haupt- u. Hilfsbürste |
| II Steuerleitung Hauptschalter | 0-18 Anzapfungen am Trafo |
| III Überbrückungswiderstände | M Traktionsmaschinen |
| a,b Lastschalter | F Fahrtwendeschalter |

Bild 5.4 Schematische Darstellung eines Stufenschalters mit gestreckter Kontaktbahn (Bauart BBC) [77]

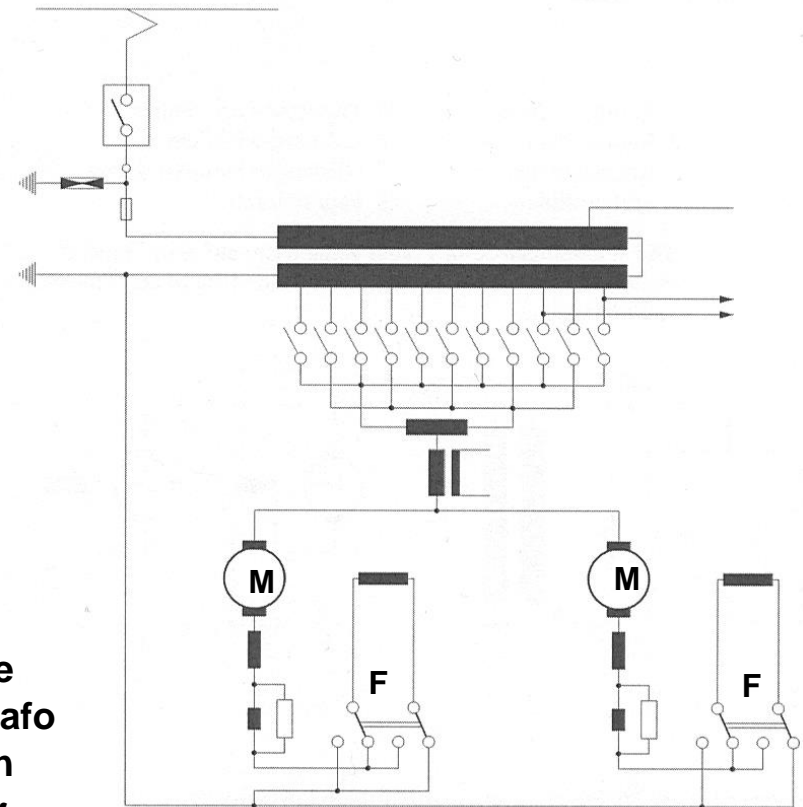
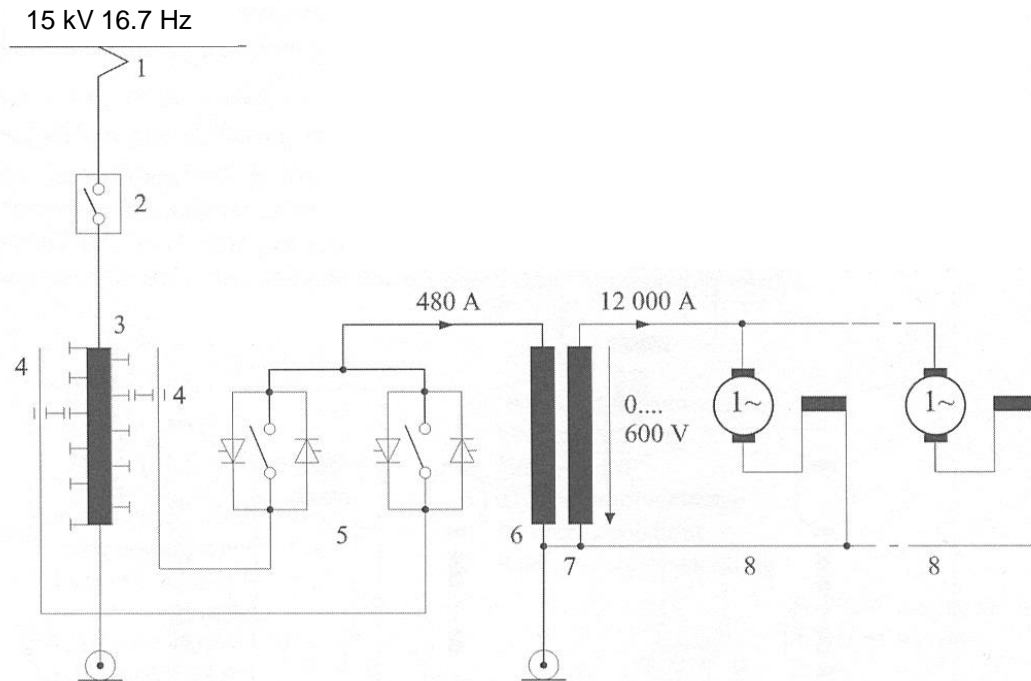


Bild 5.5 Niederspannungssteuerung für Wechselstromtriebfahrzeuge [77]



5 Leistungssteuerung



- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1 Stromabnehmer | 5 Thyristor- Lastschalter |
| 2 Hauptschalter | 6 Leistungswicklung |
| 3 Regelwicklung | 7 Niederspannungswicklung |
| 4 Stufenwähler | 8 Fahrmotoren |

Bild 5.6 Hochspannungssteuerung mit Stufenschaltwerk und Thyristor - Lastschalter [81]

5 Leistungssteuerung

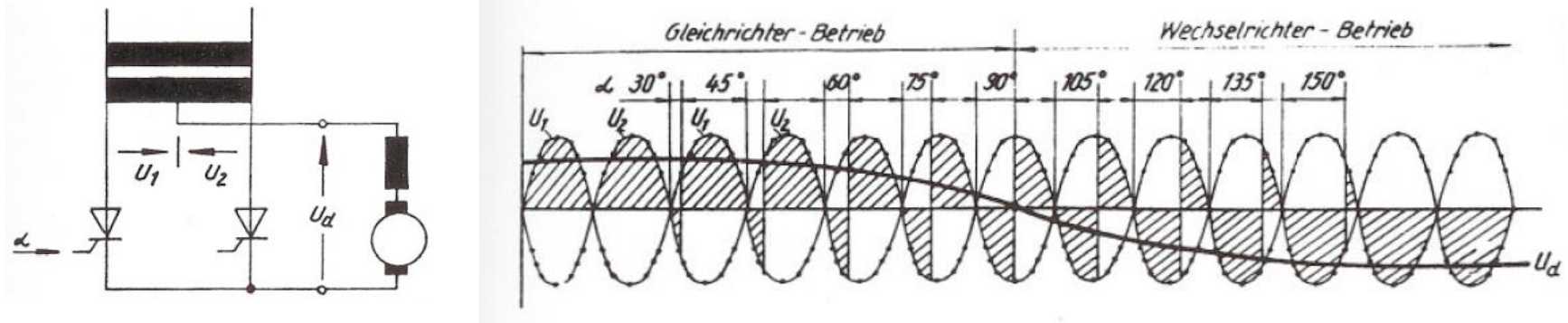
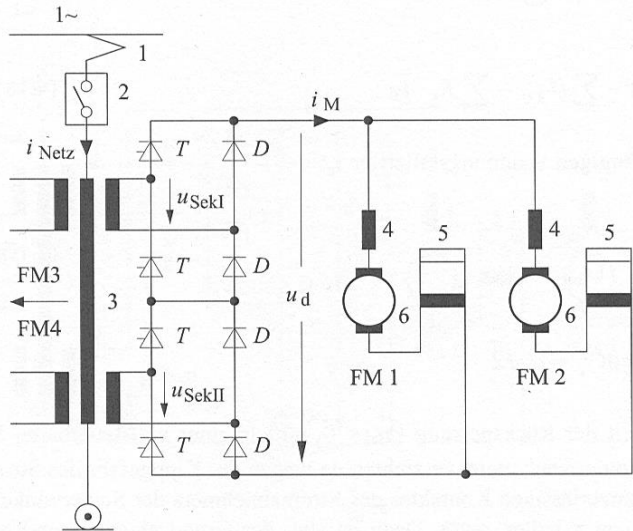


Bild 5.7 Zweipuls-Mittelpunktschaltung (Gleichspannungsbildung) [81]



- 1 Stromabnehmer
 - 2 Hauptschalter
 - 3 Transformator
 - 4 Glättungsdrossel
 - 5 Glättungshunt
 - 6 Fahrmotor
- T Thyristor
D Diode

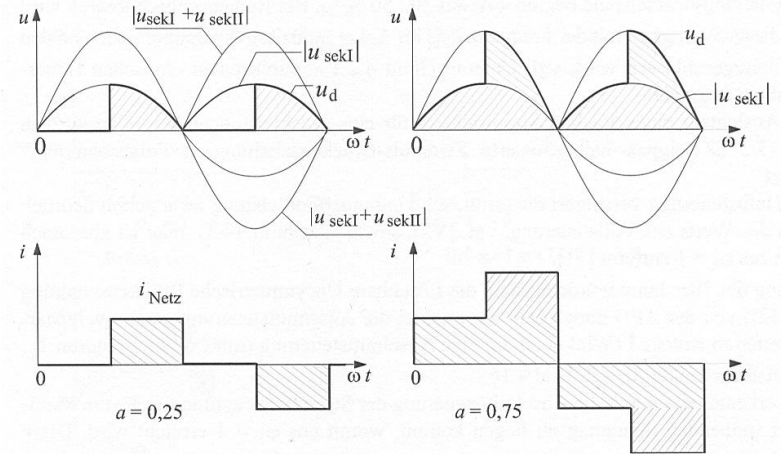


Bild 5.8 Zweigpaar-halbgesteuerte Zweipuls-Brückenschaltung in Folgesteuerung [81]



5 Leistungssteuerung

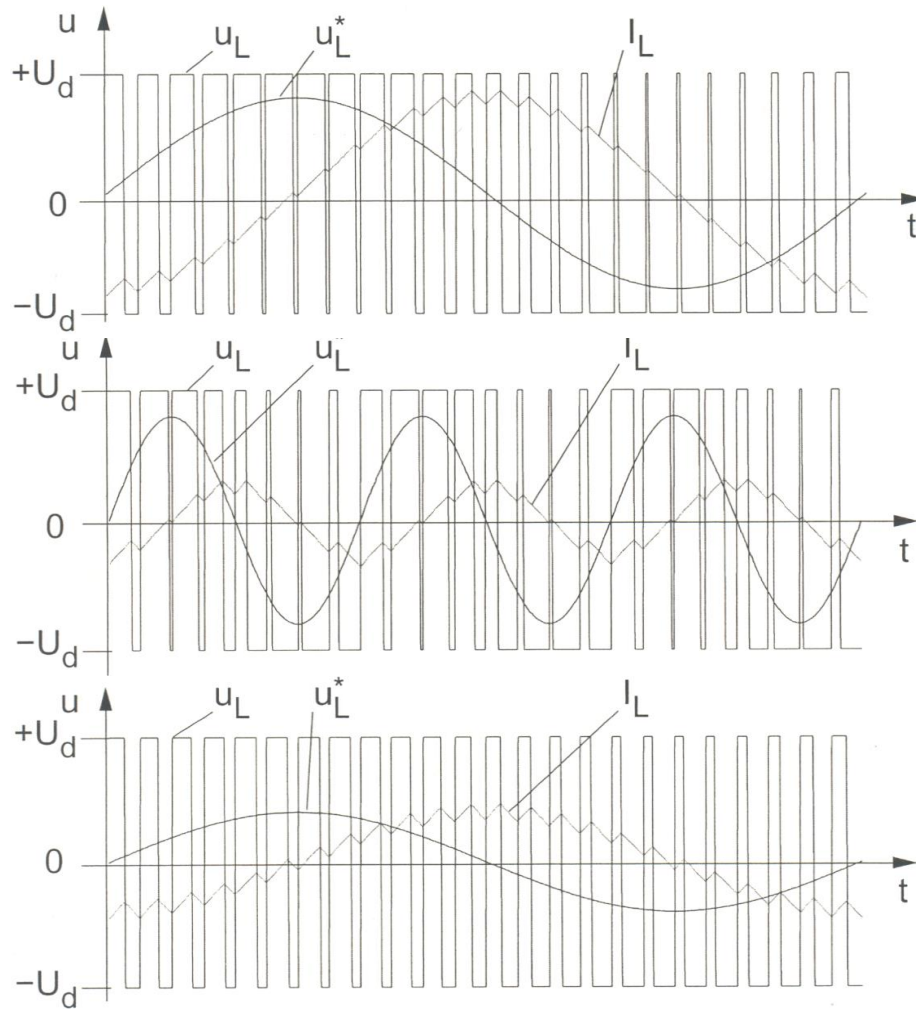


Bild 5.9 Pulsweitenmodulation [81]

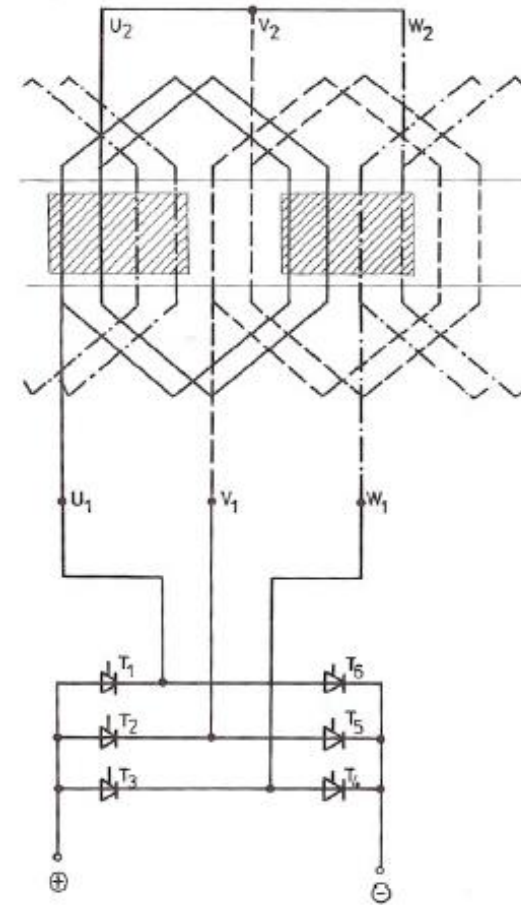


Bild 5.10 Speisung einer zweipoligen Drehstromwicklung über einen Wechselrichter [81]



5 Leistungssteuerung

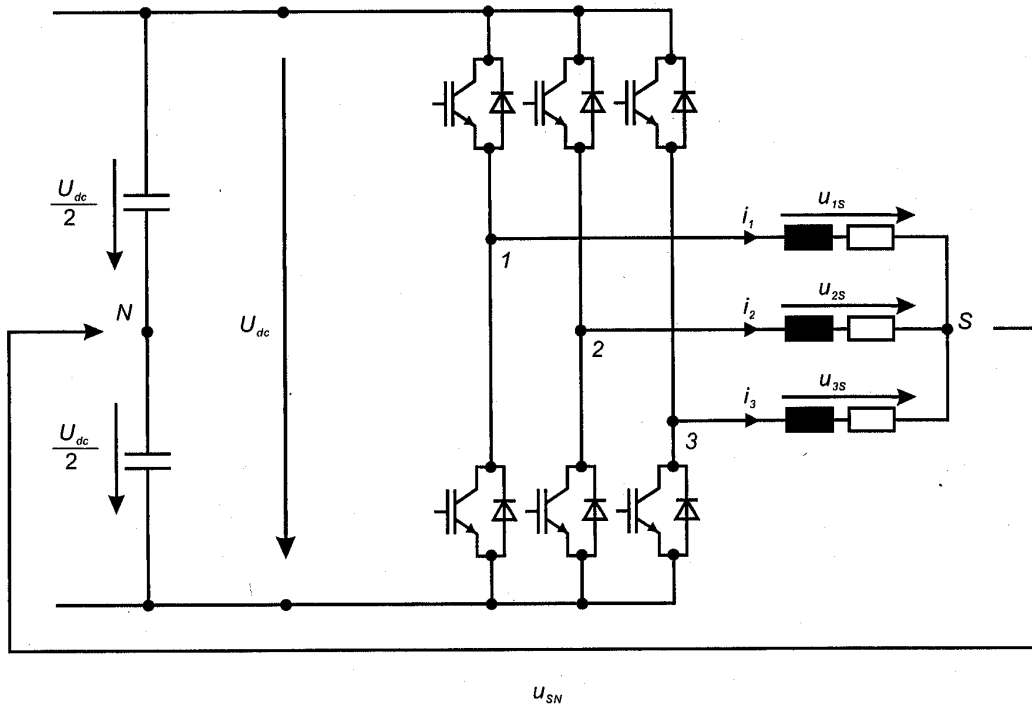


Bild 5.11 Dreiphasiger Wechselrichter [81]

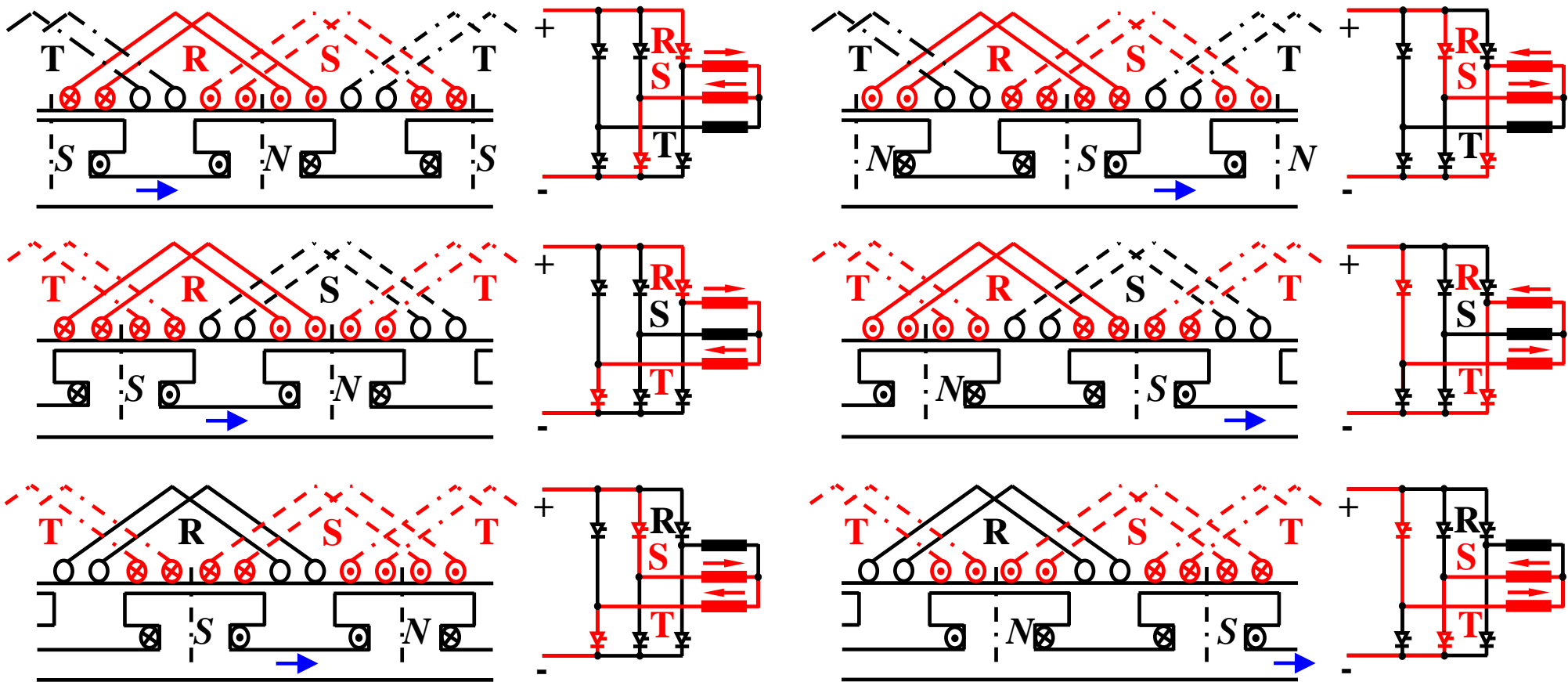


Bild 5.12 Bildung des Drehfeldes bei Wechselrichterspeisung

5 Leistungssteuerung

5.5 Rekuperation, Netzurückwirkungen

Rekuperation:	Rückspeisung der Bremsenergie ins Netz Dies ist nur bei Verwendung eines 4Q-Stellers möglich.
Voraussetzungen:	Aufnahmefähigkeit des Bahnnetzes Kein Ausfall der Fahrleitung
Netzurückwirkungen:	Durch die WR-Aussteuerung werden Stromüberschwingungen in die Fahrleitung übertragen, die andere Triebfahrzeuge bzw. das Bahnnetz beeinflussen. Dadurch können Probleme auch bei den Zugsicherungs- Systeme entstehen.
Abhilfemaßnahmen:	L-C-Schaltungen im WR



- 6** **Traktionsmaschinen**
- 6.1 Besonderheiten bei der Auslegung
- 6.2 Gleichstrommaschine
- 6.3 Einphasenwechselstrommaschine
- 6.4 Drehstromasynchronmaschine
- 6.5 Drehstromsynchronmaschine
- 6.6 Traktionsgeneratoren
- 6.7 Bauarten von Traktionsmaschinen

6 Traktionsmaschine

6.1 Besonderheiten bei der Auslegung

Mechanische Beanspruchung

Stoßbelastung: in allen Richtungen (3- 50 g)
berührungsfreie Dichtungen bei rotierenden Teilen
kompakte Bauweise

Thermische Beanspruchung

Umgebungstemperatur: - 40 °C bis +50 °C
Luftfeuchtigkeit: bis 100 %
extrem hohe thermische Ausnützung
Isolationsklasse 200 max. 240 - 250 °C Wicklungstemperatur
Isolationsklasse 220 max. 260 - 270 °C

Elektrische Beanspruchung (Norm: EN 60349)

Wechselrichterspeisung: $du/dt = 5 - 10 \text{ kV}/\mu\text{s}$

Lebensdauer: 30 - 50 Jahre



6 Traktionsmaschine

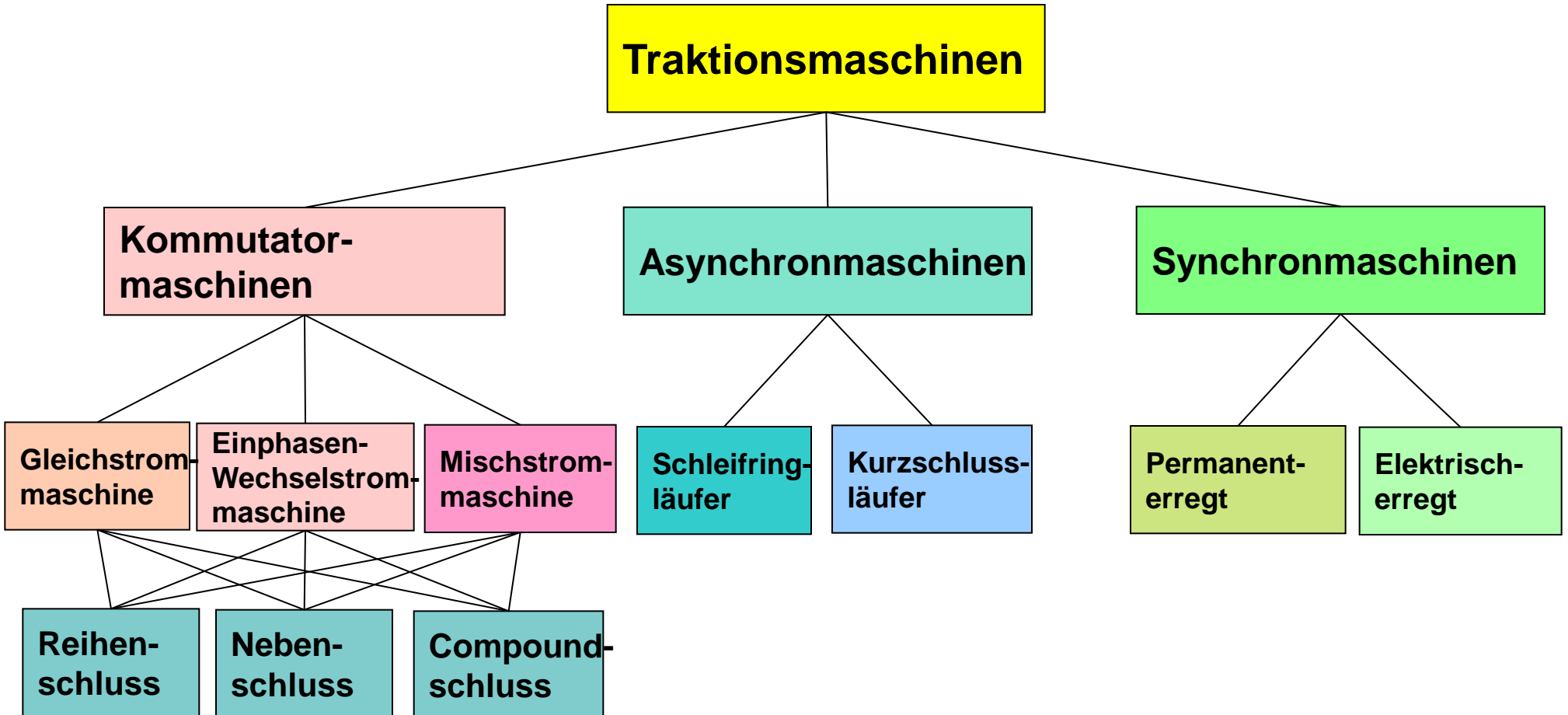
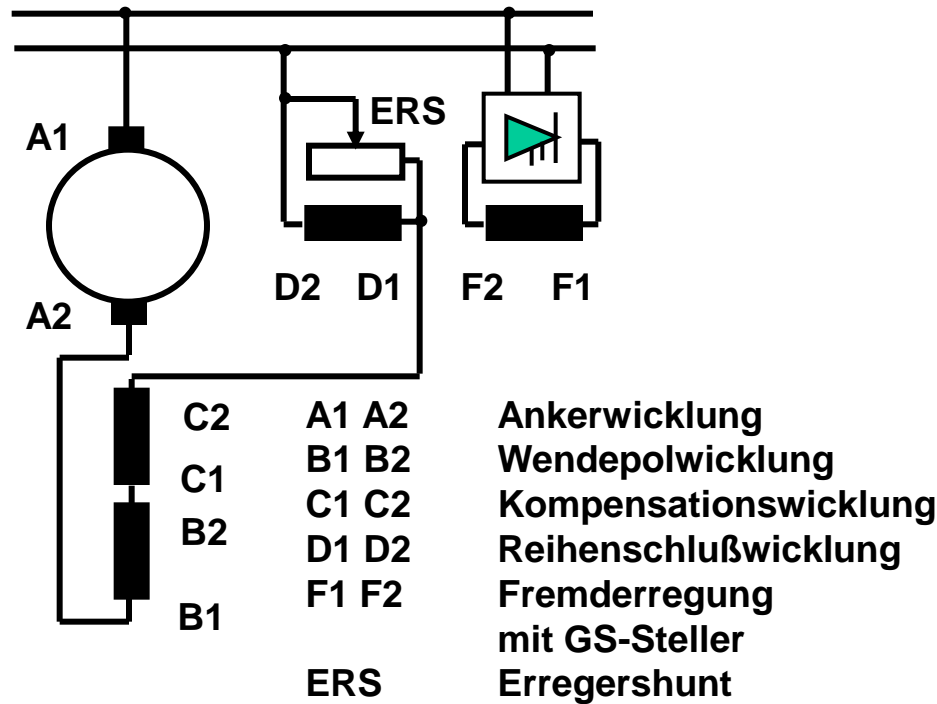


Bild 6.1 Einteilung der Traktionsmaschinen

6 Traktionsmaschine

6.2 Gleichstrommaschine



$$U = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

$$M = k_2 \cdot I_A \cdot \Phi$$

$$n = U / k_1 \cdot \Phi - I_A \cdot R_A / k_1 \cdot \Phi$$

U	Spannung
I_A	Ankerstrom
R_A	Ankerwiderstand
n	Drehzahl
Φ	mag. Fluss

Bild 6.2 Ersatzschaltbild GS-Bahnmotor mit gemischter Erregung

6 Traktionsmaschine

Nennleistung	96 kW
Nenndrehzahl	1480 min ⁻¹
Nennmoment	620 Nm
Nennspannung	425 V

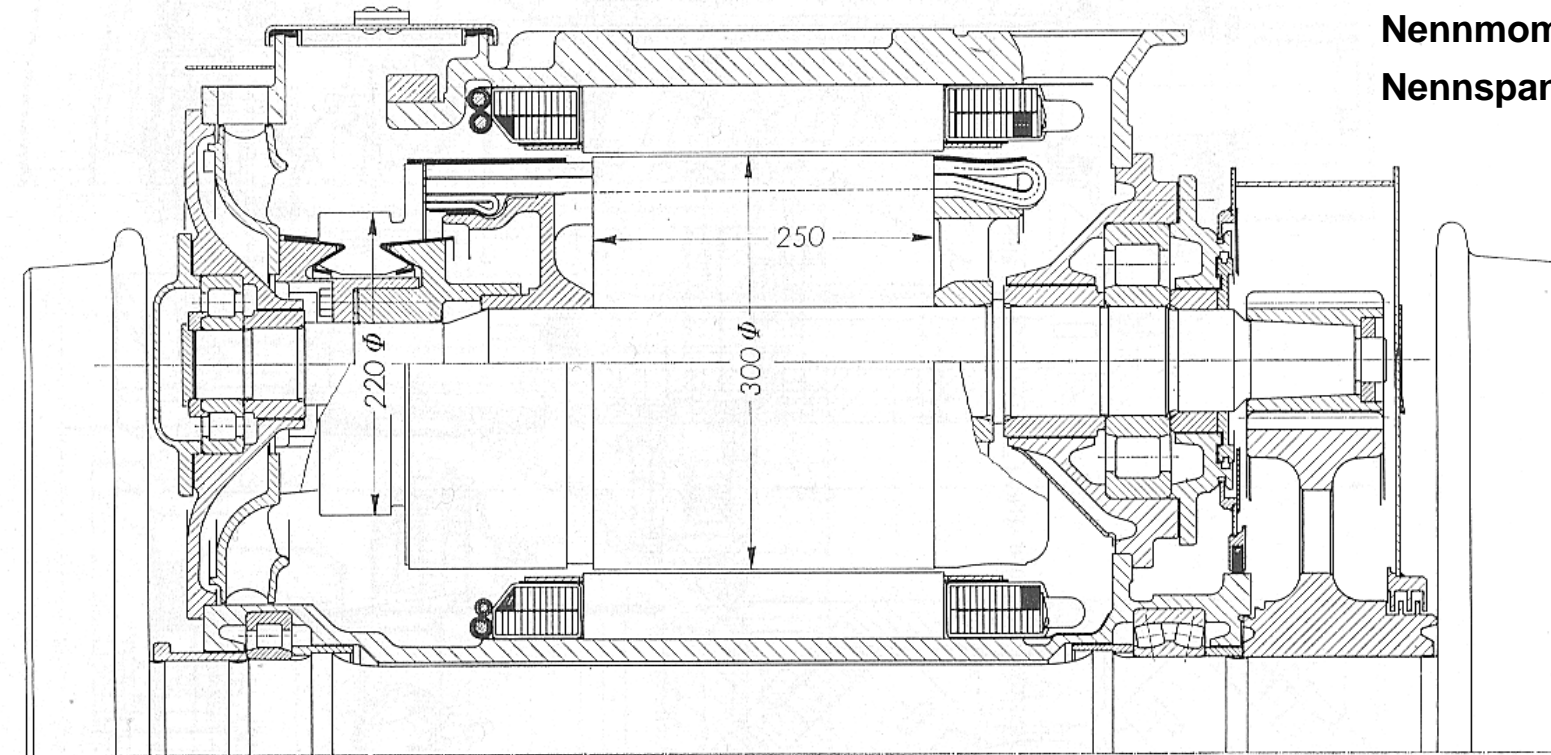
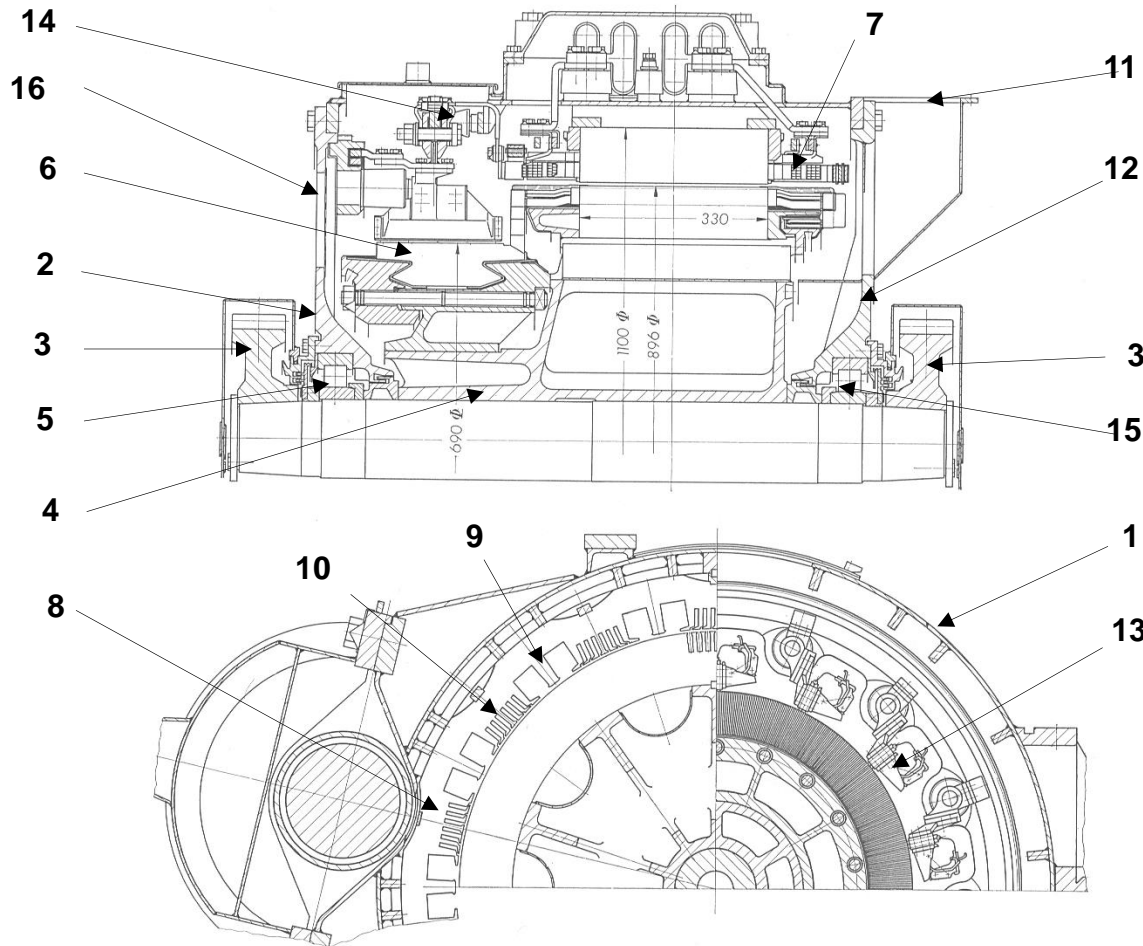


Bild 6.3 Schnitt Gleichstrommaschine eines Tatzlagerantriebs (BBC Baden) [3]

6 Traktionsmaschine

6.3 Einphasenwechselstrommaschine

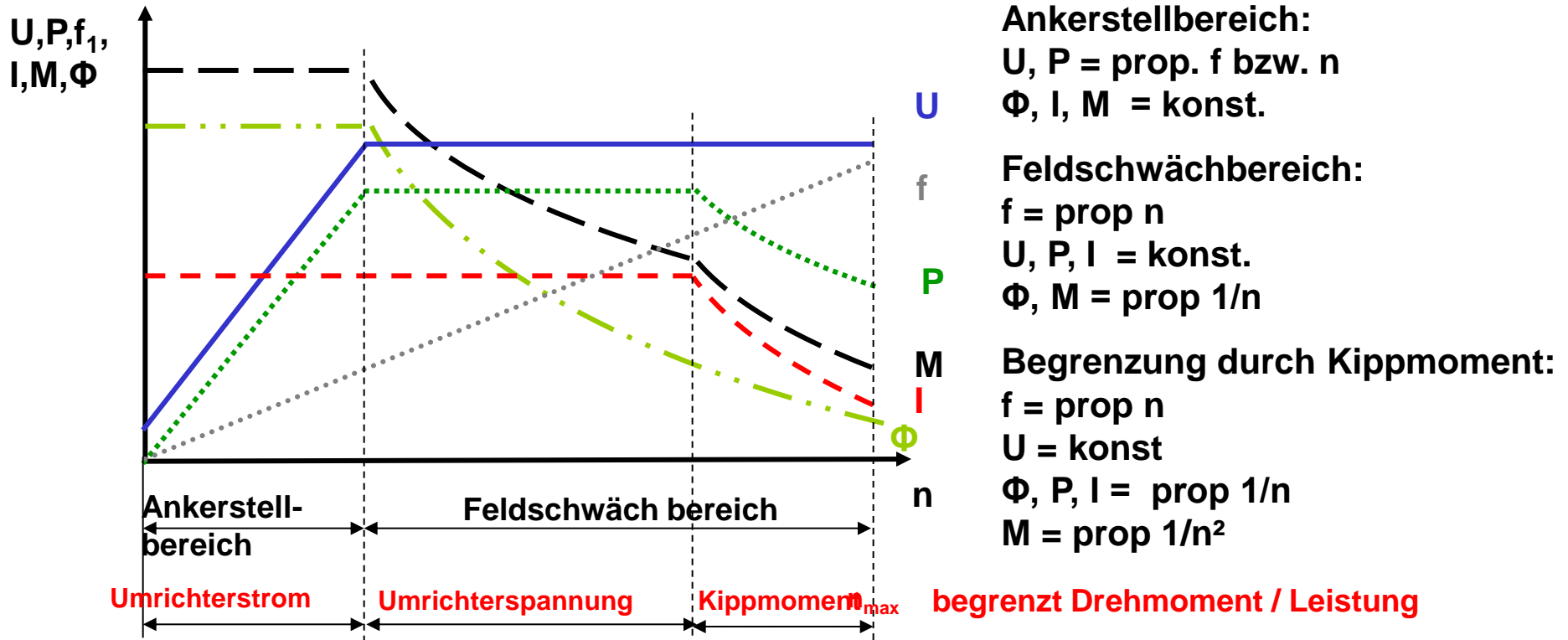


- 1 Statorgehäuse
- 2 Lagerschild KS
- 3 Kleinrad
- 4 Rotorhohlwelle
- 5 Lager kollektorseitig (KS)
- 6 Kollektor
- 7 Felderregewicklung
- 8 Statorblechpaket mit Hauptpole
- 9 Wendepole
- 10 Nuten für Kompensationswicklung
- 11 Lufteintrittstutzen
- 12 Lagerschild NKS
- 13 Kohlenbürsten
- 14 Bürstenbrille
- 15 Lager (NKS)
- 16 Luftaustrittsgitter

Bild 6.4 Längs- und Querschnitt Einphasenwechselstrommaschine [77]

6 Traktionsmaschine

6.4 Drehstromasynchronmaschine



Ankerstellbereich:
 $U, P = \text{prop. } f \text{ bzw. } n$
 $\Phi, I, M = \text{konst.}$

Feldschwächbereich:
 $f = \text{prop } n$
 $U, P, I = \text{konst.}$
 $\Phi, M = \text{prop } 1/n$

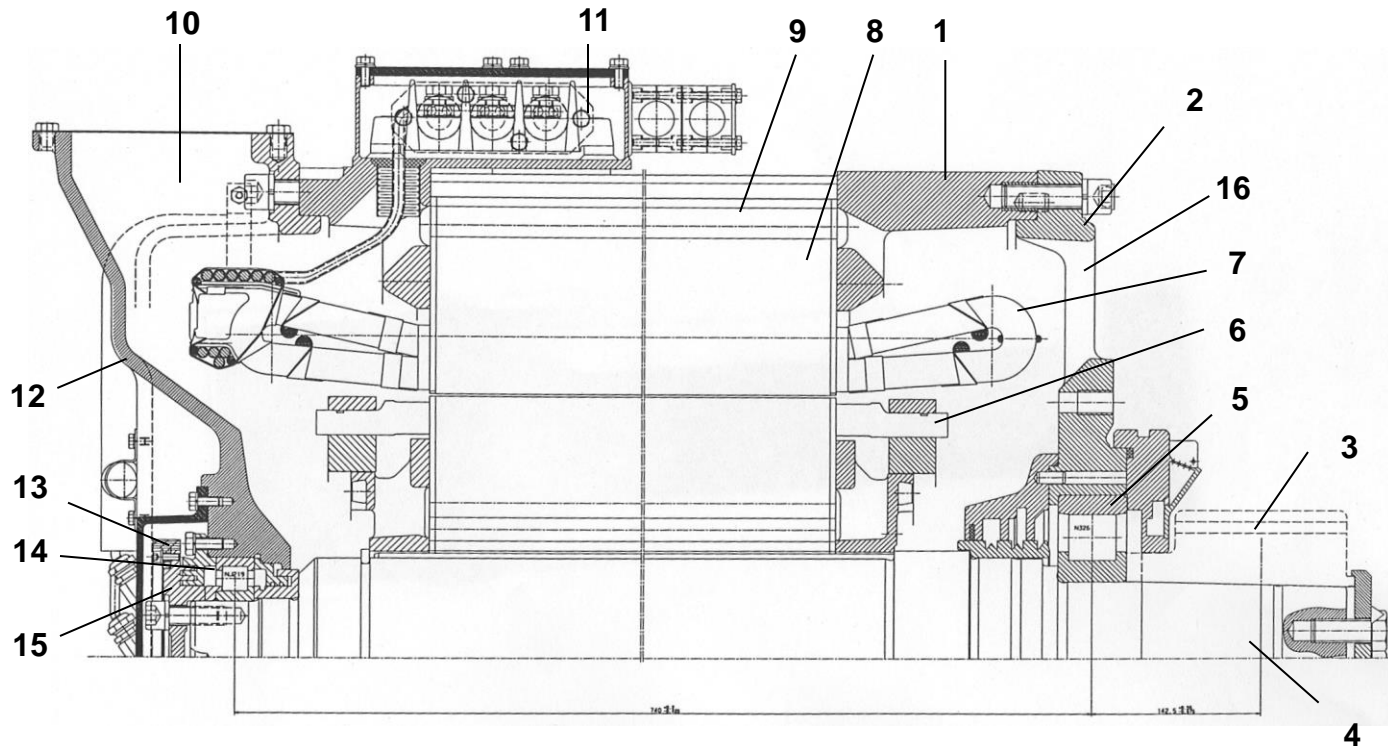
Begrenzung durch Kippmoment:
 $f = \text{prop } n$
 $U = \text{konst}$
 $\Phi, P, I = \text{prop } 1/n$
 $M = \text{prop } 1/n^2$

Bild 6.5 Steuerkennlinien einer ASM

keine Berücksichtigung von: $s, \cos\phi$ und η



6 Traktionsmaschine



- 1 Statorgehäuse
- 2 Lagerschild AS
- 3 Kleinrad
- 4 Rotorwelle
- 5 AS- Lager
- 6 Kurzschlusswicklung
- 7 Statorwicklung
- 8 Statorblechpaket
- 9 Kühlkanäle
- 10 Lufteintrittsstutzen
- 11 Klemmenkasten
- 12 BS-Lagerschild
- 13 Impulsgeberscheibe
- 14 BS-Lager
- 15 Impulsgeber
- 16 Luftaustrittsgitter

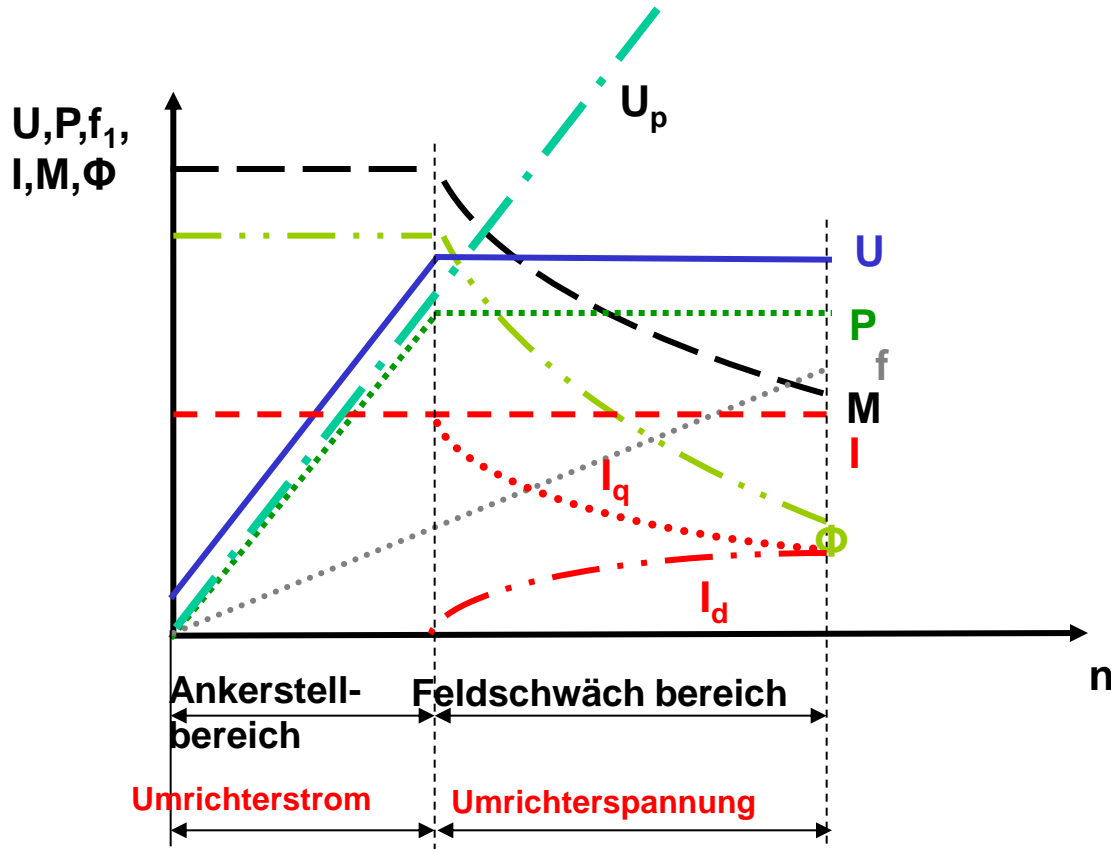
Leistung 1100 kW
max. Motormoment 8120 Nm
Masse 2080 kg

Spannung 2190 V
max. Motordrehzahl 2900 min⁻¹

Bild 6.6 Längsschnitt einer fremdventilierten Asynchronmaschine (Adtranz) [3]

6 Traktionsmaschine

6.5 PM - Drehstromsynchronmaschine



$$U_p = k_1 \cdot n \cdot \Phi$$

$$M = k_2 \cdot I_q \cdot \Phi \quad (\text{bei } X_d = X_q)$$

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2$$

$$M \sim I_q \cdot \Psi + (X_d - X_q) \cdot I_d \cdot I_q$$

bei vergrabenen Magneten
 $X_d < X_q$

bei negativen I_d wirkt das
 Reluktanzmoment positiv

Bild 6.7 Steuerkennlinie einer PSM (Permanentmagnet-Synchronmaschine)

6 Traktionsmaschine

PM - Drehstromsynchronmaschine

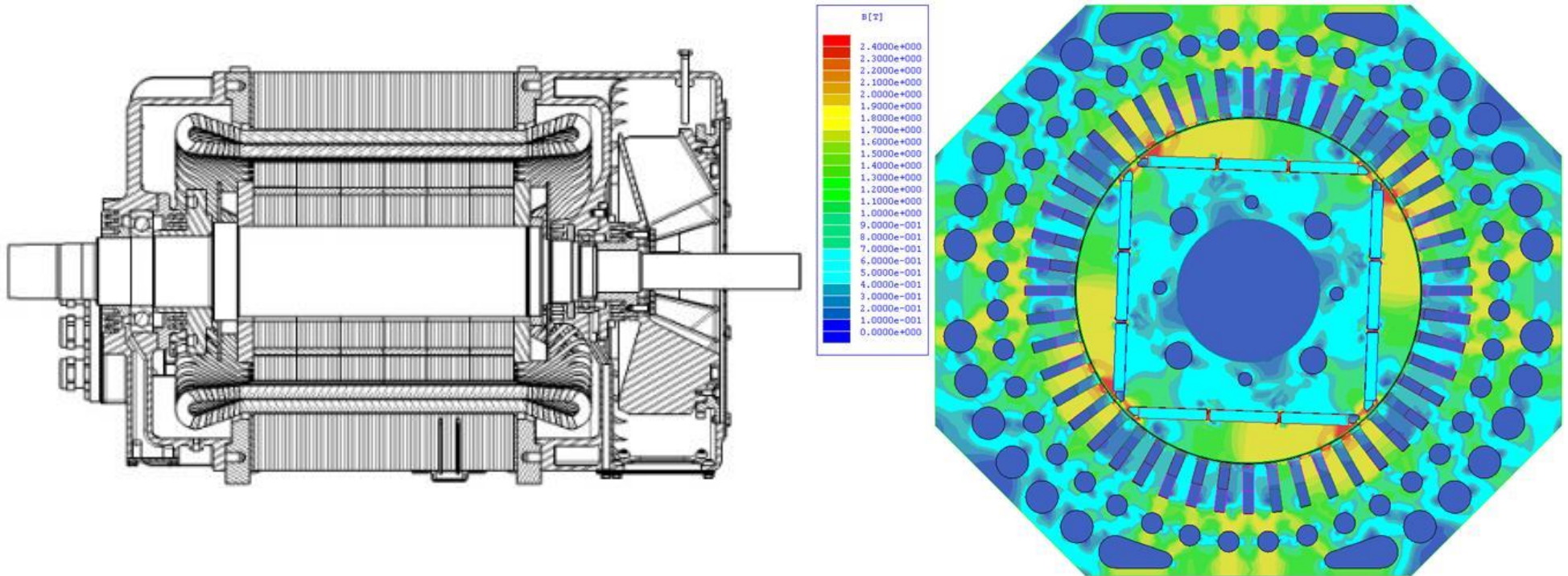


Bild 6.8 Längs- und Querschnitt einer PSM (FE-Berechnung der mag. Induktion bei einer vierpoligen PSM mit vergrabenen Magneten) [87]

6 Traktionsmaschine

PM - Drehstromsynchronmaschine

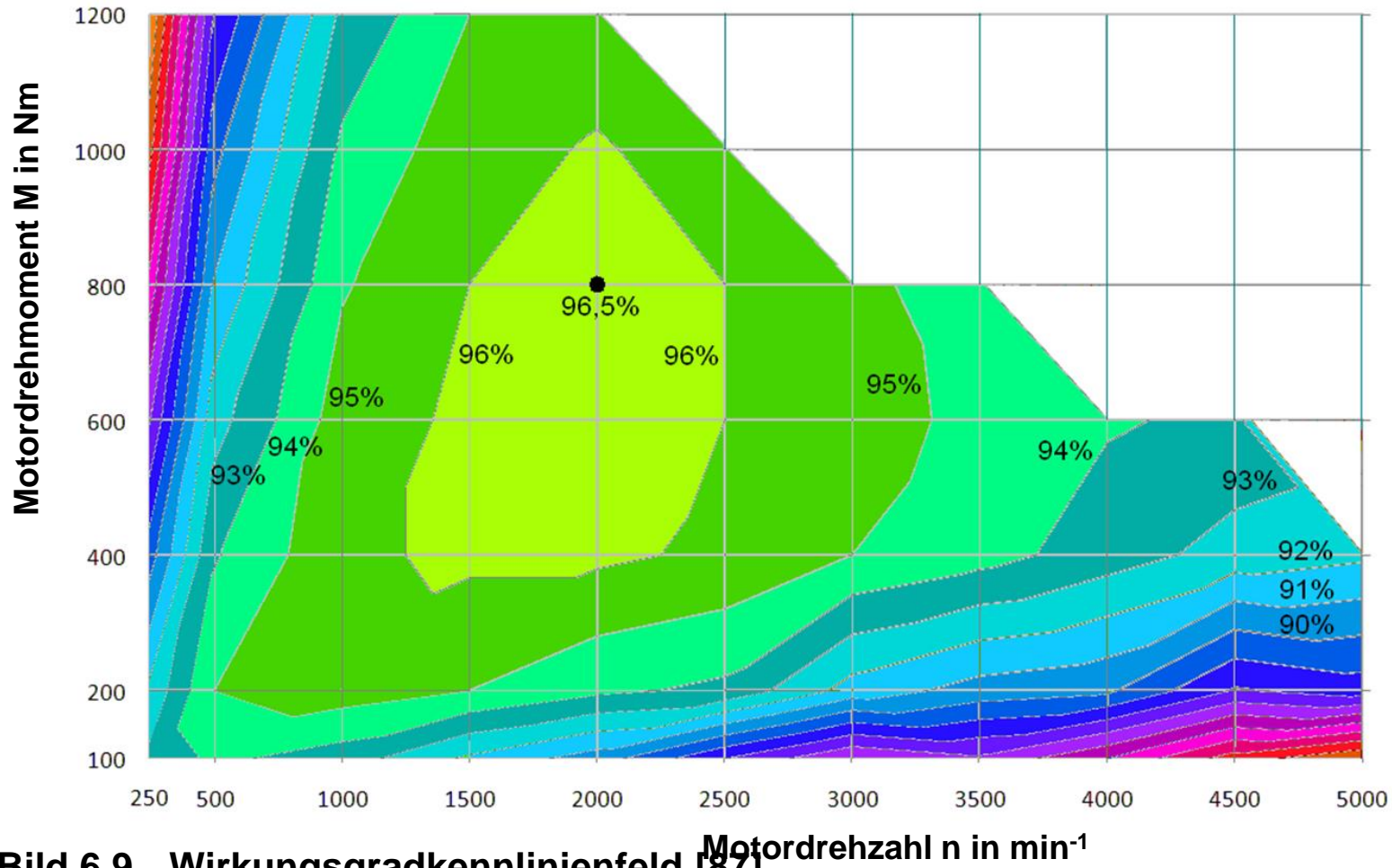


Bild 6.9 Wirkungsgradkennlinienfeld [87]



6 Traktionsmaschine

Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (1)

1) Ausfall der Wechselrichtersteuerung bei hohen Drehzahlen

wenn $n > n_{\max}$ $U_p > U_{s \max}$ wenn $I_{sd} = 0$

Problem: max. Spannungsfestigkeit der Halbleiterbauelemente im WR wird überschritten

Lösungsansatz: Elektronischer Schalter zwischen WR und PSM

2) Schleppverluste bei Rollphasen des Triebfahrzeuges

Eisenverluste vor allem im Stator durch magnetischen Fluss der PM.

Lösungsansatz: Feldschwächender negativer I_{sd} verringert magnetischen Fluss, erzeugt jedoch Kupferverluste



6 Traktionsmaschine

Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (2)

3) Kurzschlussstrom bei Schaden in der Statorwicklung

Durch mag. Fluss der PM wird in der angetriebenen Maschine (Generator) ein Dauerkurzschlussstrom fließen. Dadurch entsteht ein Bremsmoment an dieser Traktionsmaschine.

Lösungsansatz: Dauerkurzschlussstrom ca. 2-3 x Nennstrom, bei üblicher Zeitkonstante der Maschine Betrieb einige Minuten mit thermischer Überlast möglich. „Selbsteilungseffekt“ durch Übertemperatur und Entmagnetisierung der PM.

4) Notwendigkeit eines Rotorlagegebers

Die Winkelposition des Rotors ist für die Regelung von I_{sq} und I_{sd} notwendig.

Lösungsansatz: Geberlose Regelung (z.B. INFORM-Verfahren der TU Wien)



6 Traktionsmaschine

Problemfelder bei der Anwendung von PSM als Antriebsmotor (3)

5) Temperaturabhängigkeit des magnetischen Flusses der PM

Motor: $M = k \cdot \Phi \cdot I_{sq}$ T steigt \rightarrow Φ sinkt

Motor: Verminderung des Drehmoments

Generator: $U = k \cdot \Phi \cdot n$ T steigt \rightarrow Φ sinkt

Generator: Verminderung der Polradspannung

6) Für Feldschwächung muss ein nicht direkt drehmomentbildender Strom I_d in die Statorwicklung eingepreßt werden

Das bewirkt eine Erhöhung der Statorkupferverluste ($P_{ver} = I_s^2 \cdot R$), vor allem im hohen Drehzahlbereich. Bei PSM mit vergrabenen Permanentmagneten kann jedoch das zusätzlich Reluktanzmoment ausgenutzt werden.

7) Kein Gruppenantrieb möglich

Pro PM-Maschine ist ein eigener Wechselrichter notwendig



6 Traktionsmaschine

6.6 Traktionsgeneratoren (konventionell mit Erregermaschine)

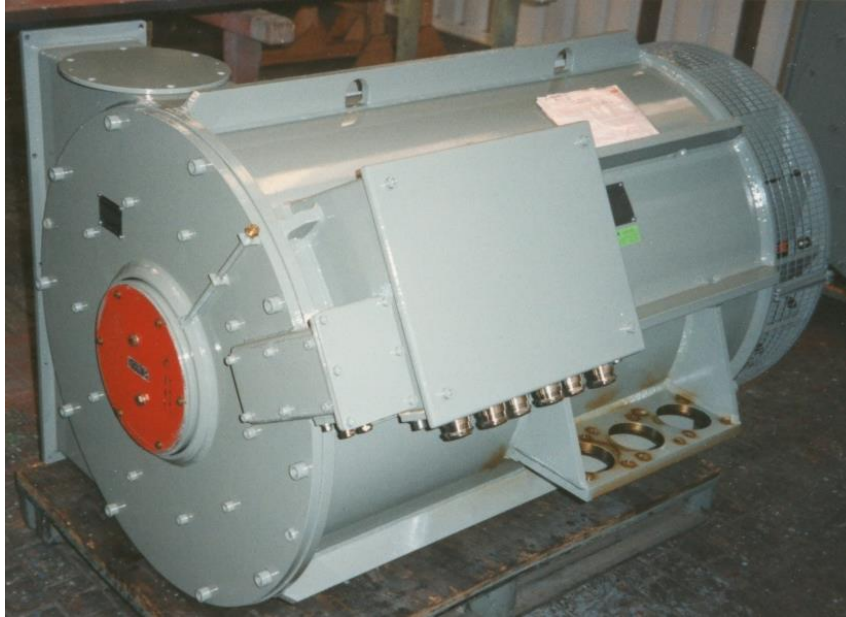


Bild 6.10 Traktionsgenerator (Adtranz) [3]

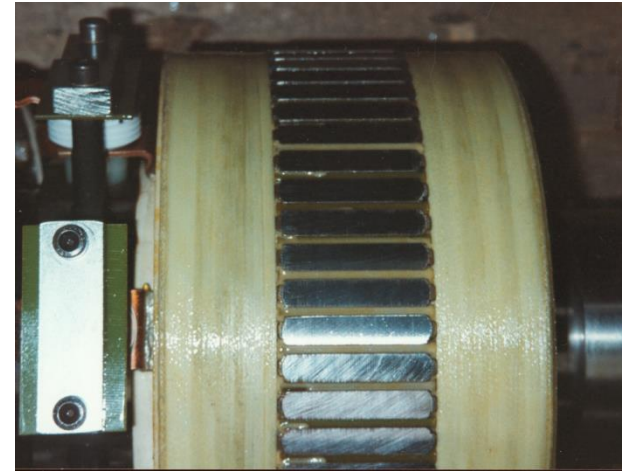
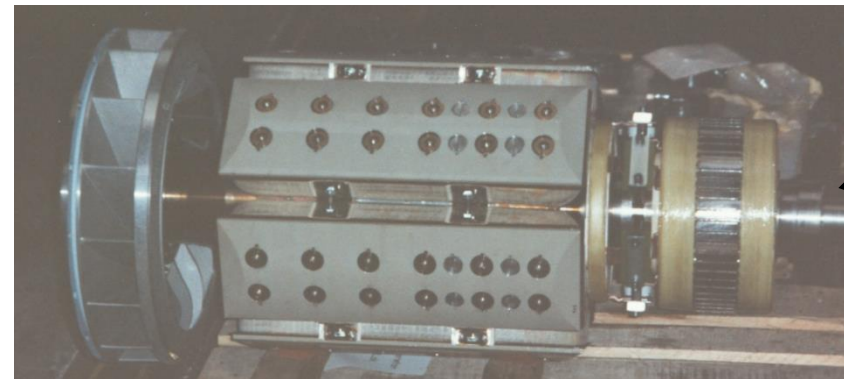


Bild 6.11 Ankerwicklung der Erregermaschine und mitrotierender Diodenbrücke [3]

Bild 6.12 Rotor mit Ventilator, Schenkelpolen, mitrotierender Diodenbrücke und Ankerwicklung der Erregermaschine [3]



6 Traktionsmaschine

Traktionsgeneratoren (mit Permanentmagneten)

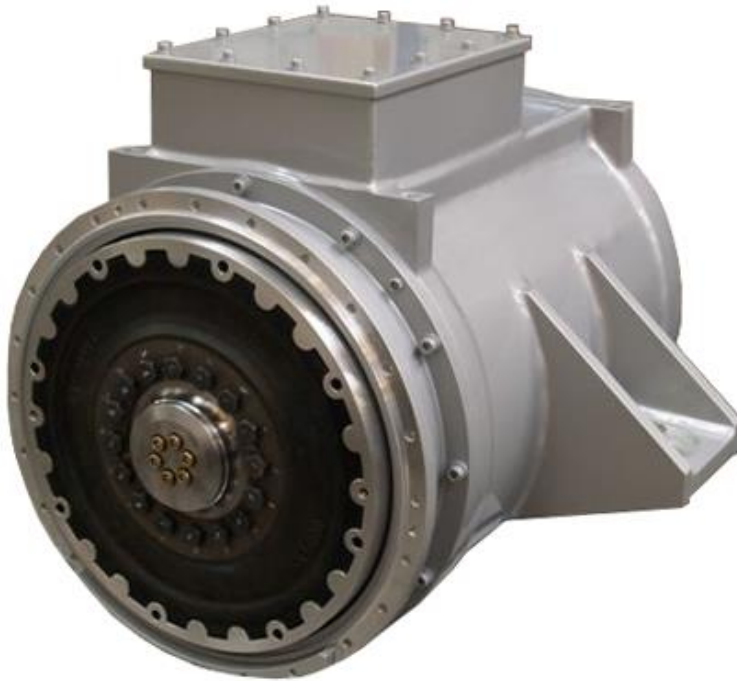
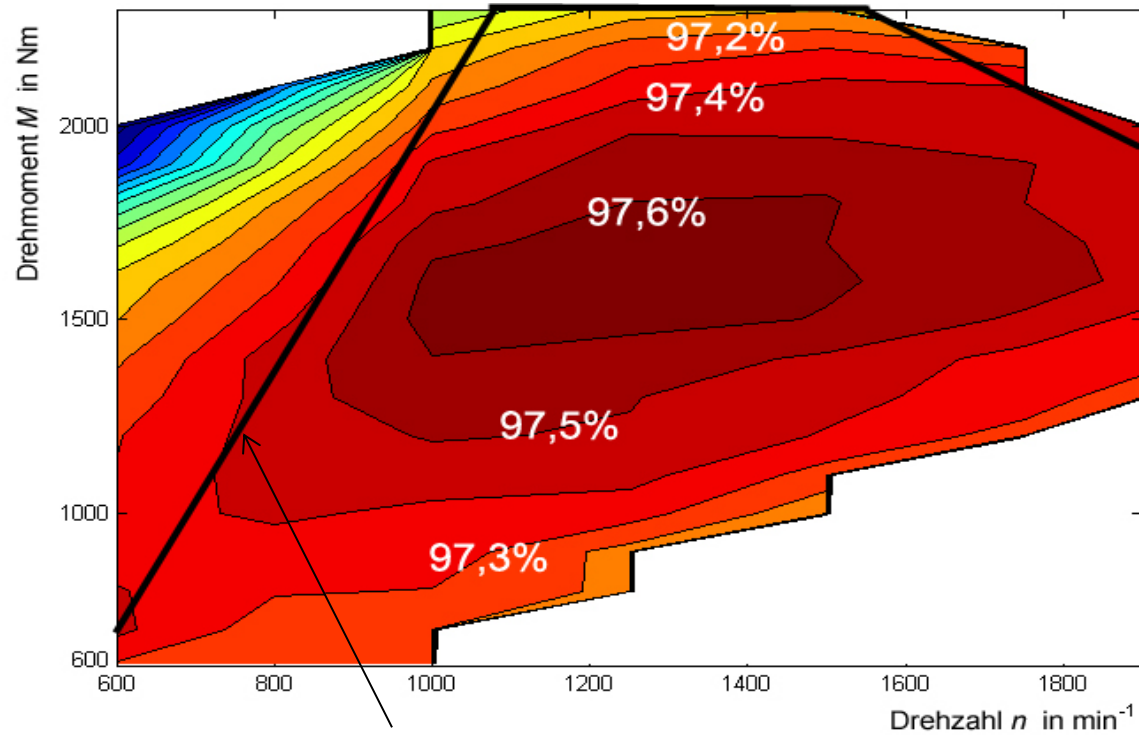


Bild 6.13 PM Generator [87]



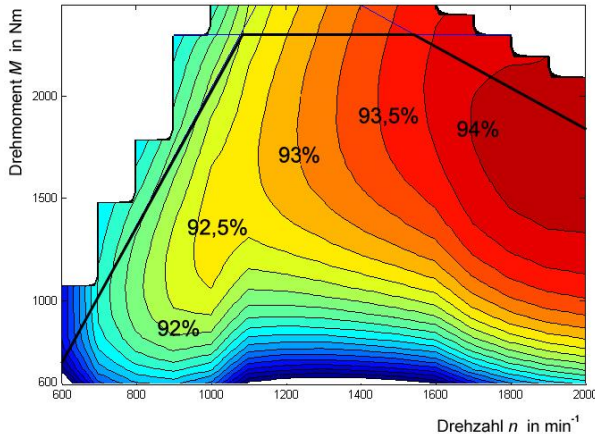
Arbeitsbereich
des Dieselmotors

Bild 6.14 Muscheldiagramm [87]

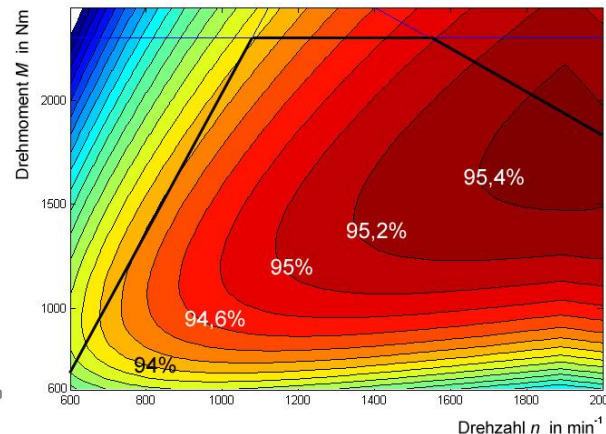
6 Traktionsmaschine

Traktionsgeneratoren (mit Permanentmagneten)

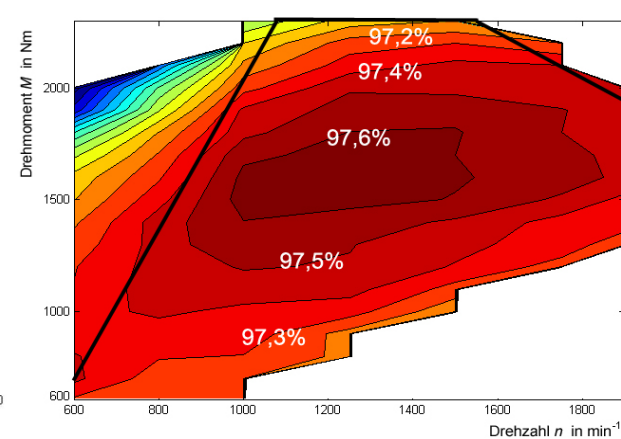
Konventioneller Synchrongenerator



Asynchrongenerator



PM-Generator



Wirkungsgrad:

$$\eta = 92 \% - 94 \%$$

$$\eta = 94 \% - 95,4 \%$$

$$\eta = 97,2 \% - 97,6 \%$$

Verluste im Arbeitspunkt $M = 1910 \text{ Nm}$, $n = 1800 \text{ min}^{-1}$, $P_{\text{mech}} = 360 \text{ kW}$:

$$P_v = 21,6 \text{ kW}$$

$$P_v = 16,6 \text{ kW}$$

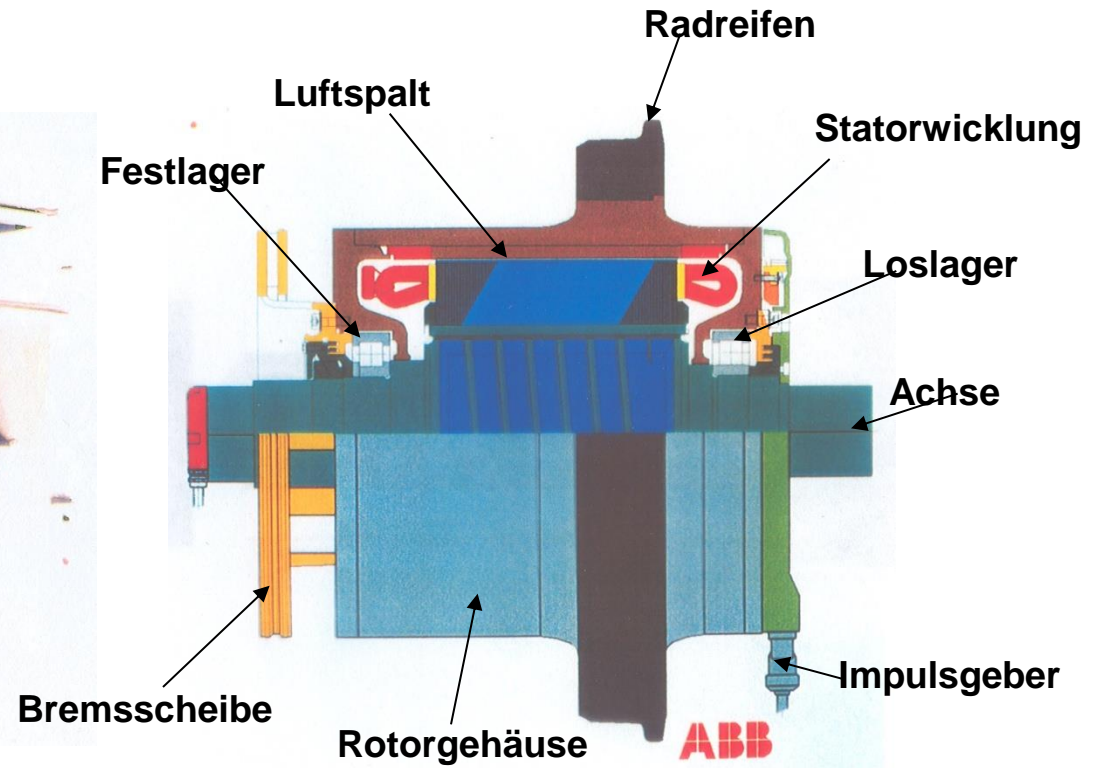
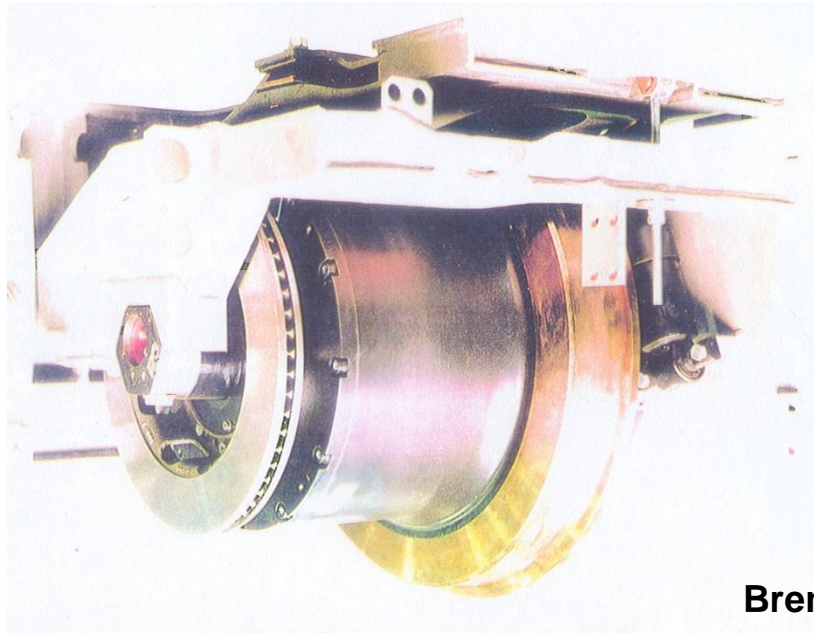
$$P_v = 9 \text{ kW}$$



6 Traktionsmaschine

6.7 Bauarten von Traktionsmaschinen

6.7.1 Direktantriebe



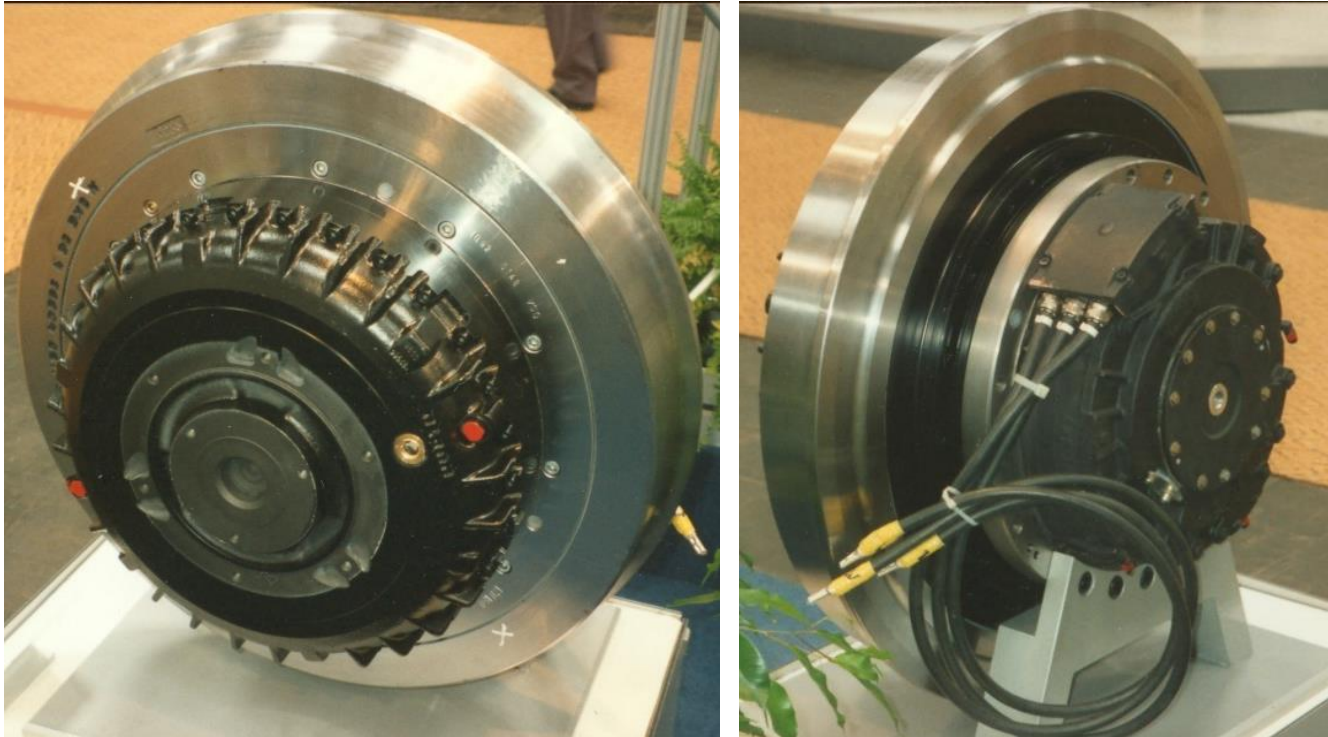
Radlast 50 kN max.
Radlastmoment 4000 Nm
max. Motordrehzahl 750 min⁻¹

Max. Motormoment 4000 Nm
Getriebeübersetzung 1
Masse 510 kg

Bild 6.15 Radnabenantriebe in ASM-Technologie (ADtranz) [3]

6 Traktionsmaschine

Radnabenantrieb mit Getriebe

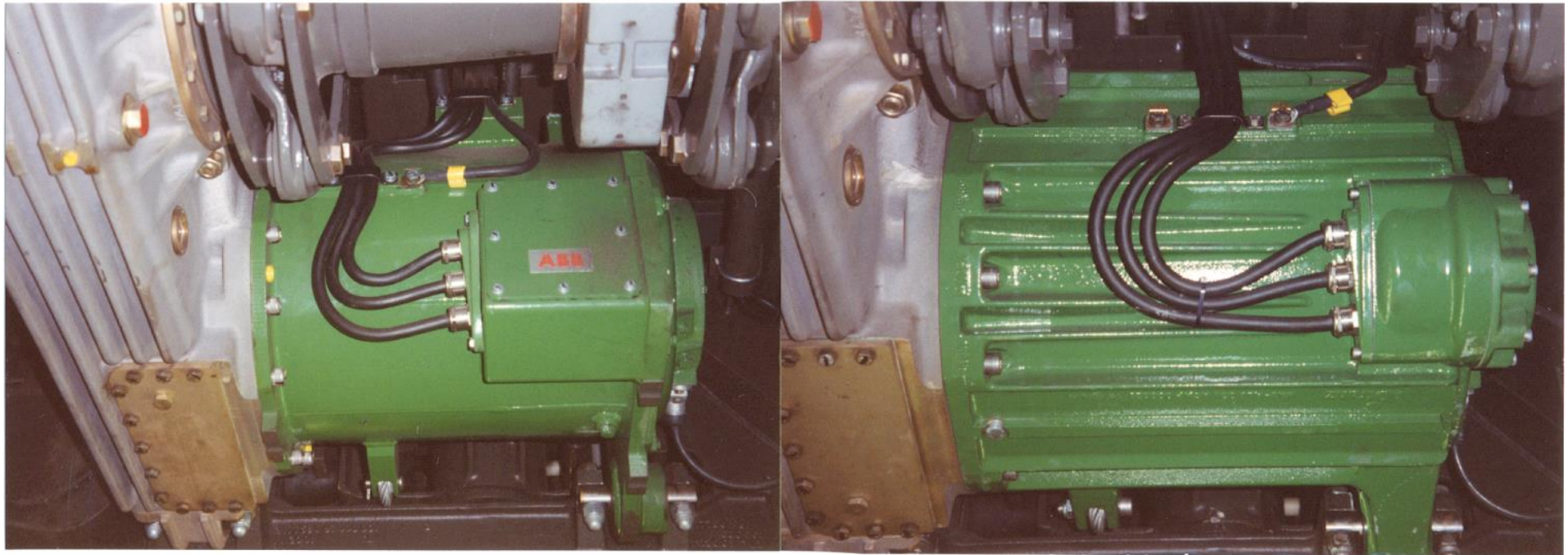


Radlast	50 kN
Radlastmoment	3220 Nm
max.. Motordrehzahl	5155 min ⁻¹
max.. Motormoment	346 Nm
Getriebeübersetzung	9,286
Planetengeräte	

Bild 6.16 Radnabenantriebe in ASM-Technologie (Siemens - Hurth) [79]

6 Traktionsmaschine

6.7.2 Flüssigkeitsgekühlte Traktionsmaschinen



Leistung 135 kW
max. Motormoment 640 Nm
max. Motordrehzahl 6000 min⁻¹

Spannung 570 V
Getriebeübersetzung 11,085
Nenn Drehzahl 2000 min⁻¹

Bild 6.17 Flüssigkeitsgekühlte Asynchrontraktionsmotor im DT4 der HHA (Adtranz) [3]

links: Stahlgehäuse: Masse 510 kg

rechts: Aluminiumgehäuse: Masse 460 kg

6 Traktionsmaschine

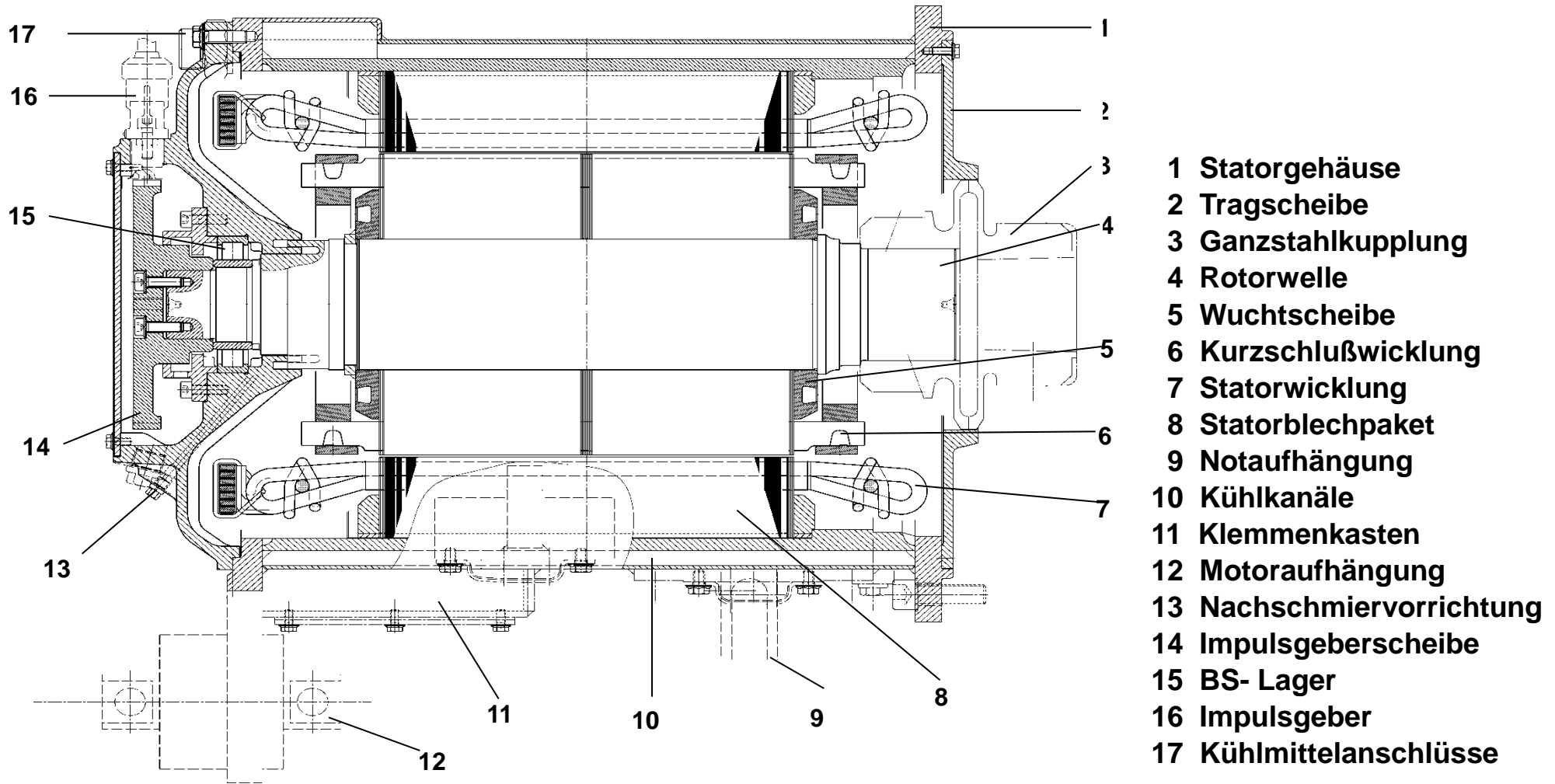


Bild 6.18 Längsschnitt: Flüssigkeitsgekühlte Asynchrontraktionsmaschine (Adtranz) [3]



6 Traktionsmaschine

Kühlmittel

Luft

Kühlflüssigkeit

mittlere Temperatur des Kühlmittels			60 °C	70 °C
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/mK	0,029	0,44
Wärmeübergangszahl	α	W/m ² K	30 - 100	1900
spez. Wärmekapazität	c	Ws/kgK	1,009	3600
Dichte	ρ	kg/m ³	1,0452	1048
spez. volumetrische Wärmekapazität	$c \cdot \rho$	Ws/m ³ K	1,0546	3772800

Beispiel: $P_{\text{mot}} : 200 \text{ kW}$ $P_{\text{verluste}} = 14 \text{ kW}$

abzuführende Verlustleistung	P_{verl}	W	14000	14000
Temperaturunterschied Ein-Austritt	ΔT	K	30	8
notwendige Kühlmenge	V'	m ³ /s	0,44	0,00046
		l/min	26500	27,8
Strömungsquerschnitt	A	mm ²	22000	1500
Strömungsgeschwindigkeit	w	m/s	20	0,31

Tabelle 6.19 Vergleich Luftkühlung - Flüssigkeitskühlung



6 Traktionsmaschine

Vorteile von flüssigkeitsgekühlten Traktionsmaschinen

- + geringe Geräusentwicklung trotz hoher Drehzahlen
- + durch Realisierung hoher Drehzahlen geringes Motorvolumen möglich
- + durch Kapselung des Motors Innenraum geschützt
- + kleiner Anschlussquerschnitt für Kühlflüssigkeit
- + hohe thermische Überlastbarkeit durch große thermische Zeitkonstante
- + Kühlung auch bei Motorstillstand

Nachteile von flüssigkeitsgekühlten Traktionsmaschinen

- geringe Kühlung des Rotors (bei alleiniger Außenmantelkühlung)
- geringe Kühlwirkung des Motorlagers bei Gehäusemantelkühlung
- derzeit nur bei kleinen Motoren bzw. Leistungen möglich
- Dichtigkeitsanforderungen an das Motorgehäuse
- Reduzierung des Aktivstatordurchmessers durch Realisierung des Kühlkanals bei identen Außenabmessungen



6 Traktionsmaschine

Vorteile für Triebfahrzeuge mit flüssigkeitsgekühlten Traktionsmaschinen

- + Entfall der Luftkanäle, Faltenbälge und Luftfilter
- + platzsparende Verlegung der Rohre und Schläuche für die Kühlflüssigkeit
- + Anordnung des Flüssigkeits-/Luft-Rückkühler im Triebfahrzeug frei wählbar
- + Geräusentwicklung des Rückkühlers gering
- + Motorverlustwärme für Heizung des Fahrzeuginnenraumes nutzbar
- + ein gemeinsamer Kühlflüssigkeitskreislauf für Motor und Wechselrichter

Nachteile für Triebfahrzeuge mit flüssigkeitsgekühlten Traktionsmaschinen

- Installation einer Flüssigkeits-/Luft-Rückkühlanlage
- Wartungsarbeiten an der Kühlanlage



- 7 Überwachungseinrichtungen**
- 7.1 Mess- und Schutzeinrichtungen
- 7.2 Sicherheitseinrichtungen (Sifa, Indusi, LZB, ETCS)
- 7.3 Leittechnik / Diagnosesysteme



7 Überwachungseinrichtungen

7.1 Mess- und Schutzeinrichtungen

Überstromschutz

Leistungshalbleiter verlangen sehr raschen Überstromschutz

Abhilfe: unverzügter Hauptschalter in Kombination mit flinken Sicherungen, Kurzschließer - Methode durch Zündung sämtlicher Thyristoren

Überlastschutz

Überlastung des Wechselrichters und der Traktionsmotoren wegen zu großen Dauerströmen

Abhilfe: Temperaturfühler in Wechselrichter und Traktionsmotoren und bei Überschreitung von Grenzwerten (Warnung - Auslösung) automatische Reduzierung der Traktionsleistung

Überspannungsschutz

Atmosphärische Entladungen in Fahrleitung können Überspannungen verursachen die empfindliche Leistungshalbleiter gefährden

Abhilfe: Überspannungsableiter

Null- und Unterspannungsschutz

Bei Spannungsausfall in der Fahrleitung muss abgeschaltet werden, um bei Spannungsrückkehr unerwünschte Betriebszustände zu vermeiden. Kurze Spannungsausfälle durch Abspringen der Stromabnehmer müssen erkannt werden.



7 Überwachungseinrichtungen

Erdschlussüberwachung

Bahnfahrzeug hat über Stromrückführungskontakte Erdpotential, so dass jeder Masseschluss zum Erdschluss wird.

Abhilfe: Differentialschutz mit Wirkung auf Hauptschalter, Erfassung des Fehlerstromes, Aktivierung des Überstromschutzes

Schleuder- und Gleitschutz

Schleuderschutz: Feststellung des Schleuderns bei ungenügender Haftreibung zwischen Rad und Schiene und Einleitung von Gegenmaßnahmen. Vergleich der Drehzahlen der einzelnen Radsätze, plötzliche Drehzahlen und Stromänderungen erkennen Schleudertendenzen frühzeitig

Abhilfe: Betätigung der Bremsen, Sanden des Radsatzes, Reduzierung der Motorleistung der Achse

Gleitschutz: Feststellung des Gleitens beim Bremsvorgang, Kombination mit Schleuderschutz, Anwendung auch bei nicht angetriebenen Achsen

Abhilfe: Reduzierung der Bremskraft (mechanische und elektrische/generatorische Bremse), Sandung,

weitere Schutzeinrichtungen bzw. Überwachungen

Strömungs - und Druckwächter in Kühlluftkanälen und Ölleitungen, Erfassung von Temperaturen und Drücken, Symmetrieüberwachung von Bauteilen,



7 Überwachungseinrichtungen

7.2 Sicherheitseinrichtungen

7.2.1 Sicherheitsfahrerschaltungen Sifa

Sicherheitsfahrerschaltungen mit Dauerbetätigung (Totmannschalter)

Fixierung eines Schaltorgans in einer bestimmten Lage z.B.
Druckschalter gegen Federkraft

Bei Nichtbetätigung: optische und akustische Warnung bzw. nach bestimmtem Fahrweg oder bestimmter Fahrzeit (nach 2,5 s) selbsttätige Leistungsabschaltung und Zwangsbremmung (nach 5 s)

Nachteil: Dauerbetätigung durch beabsichtigtes Festlegen

Sicherheitsfahrerschaltungen mit Wachsamkeitskontrolle

Kurze Betätigung eines Schaltorgans nach einem bestimmten Fahrweg (wegabhängige Wachsamkeitskontrolle) bzw. nach bestimmter Fahrzeit (zeitabhängige Wachsamkeitskontrolle) im allgemeinen abhängig von Fahrgeschwindigkeit

Bei Nichtbetätigung: optische und akustische Warnung bzw. nach bestimmtem Fahrweg oder bestimmter Fahrzeit selbsttätige Leistungsabschaltung und Zwangsbremmung
Bei Dauerbetätigung (>25 s) Aufforderung zur Bekundung der Wachsamkeit sonst Warnung bzw. Zwangsbremmung

Nachteil: zusätzliche Belastung des Triebfahrzeugführers

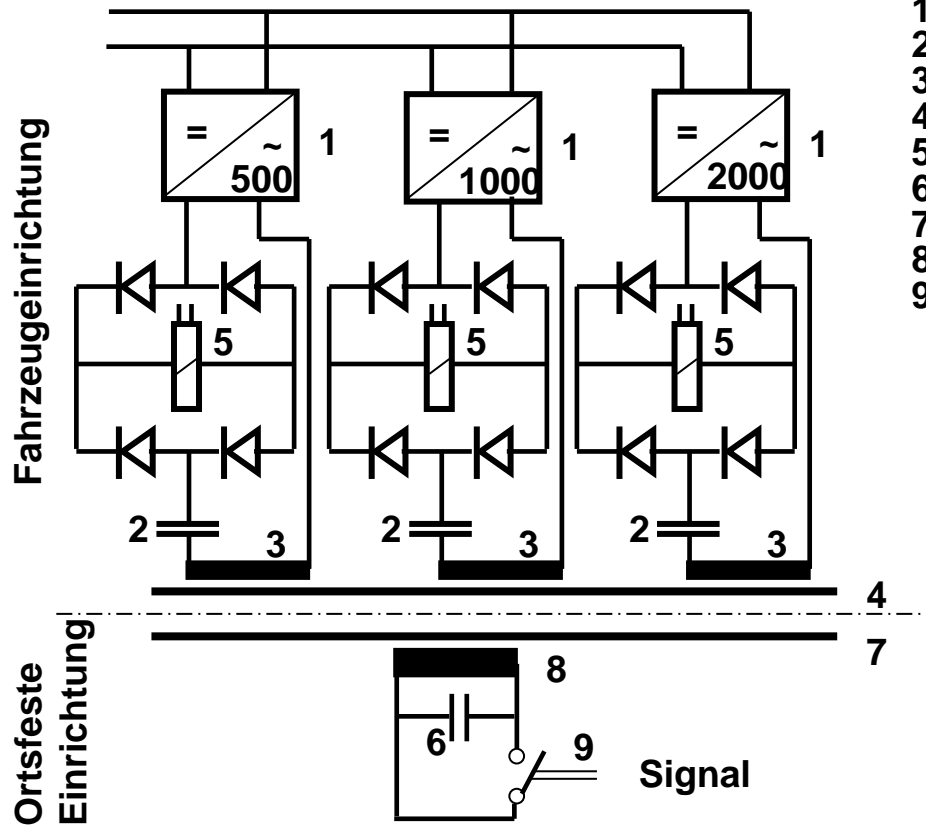
Sicherheitsfahrerschaltungen mit Aufforderung zur Wachsamkeitsbekundung

Betätigung eines Schaltorgans zur Bekundung der Aufmerksamkeit nach einer Aufforderung mit unterschiedlichen Zeitintervallen



7 Überwachungseinrichtungen

7.2.2 Punktförmige Zugbeeinflussung - Indusi



- 1 Frequenzgeneratoren (500Hz, 1000Hz, 2000Hz)
- 2 Kondensatoren der Fahrzeugresonanzkreise
- 3 Spulen auf Fahrzeugmagnet
- 4 Fahrzeugmagnet
- 5 Relais
- 6 Kondensator des Gleisresonanzkreises
- 7 Gleismagnet
- 8 Spule auf Gleismagnet
- 9 signalbetätigter Überbrückungsschalter

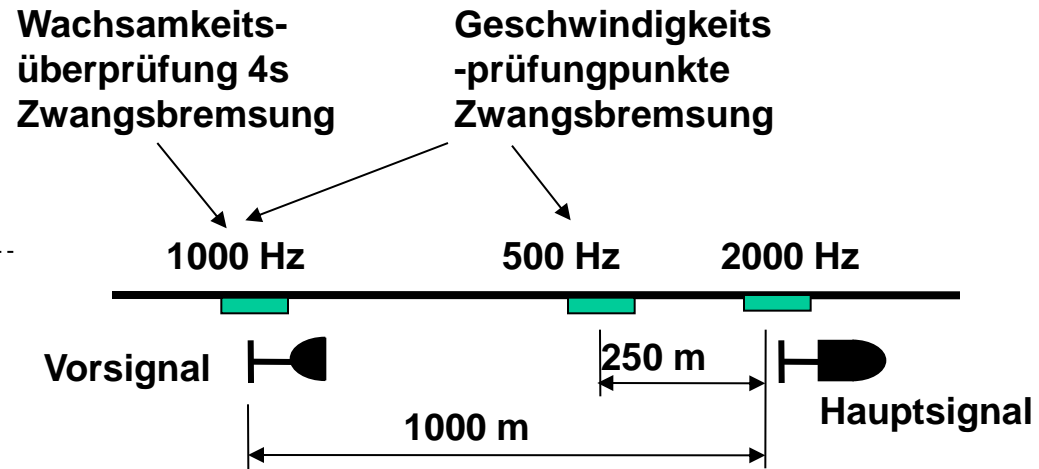


Bild 7.1 Prinzip des punktförmigen Zugbeeinflussungssystems Indusi

Bild 7.2 Anordnung der Gleismagnete und Überwachungsprinzip



7 Überwachungseinrichtungen

7.2.3 Linienförmige Zugbeeinflussung - LZB

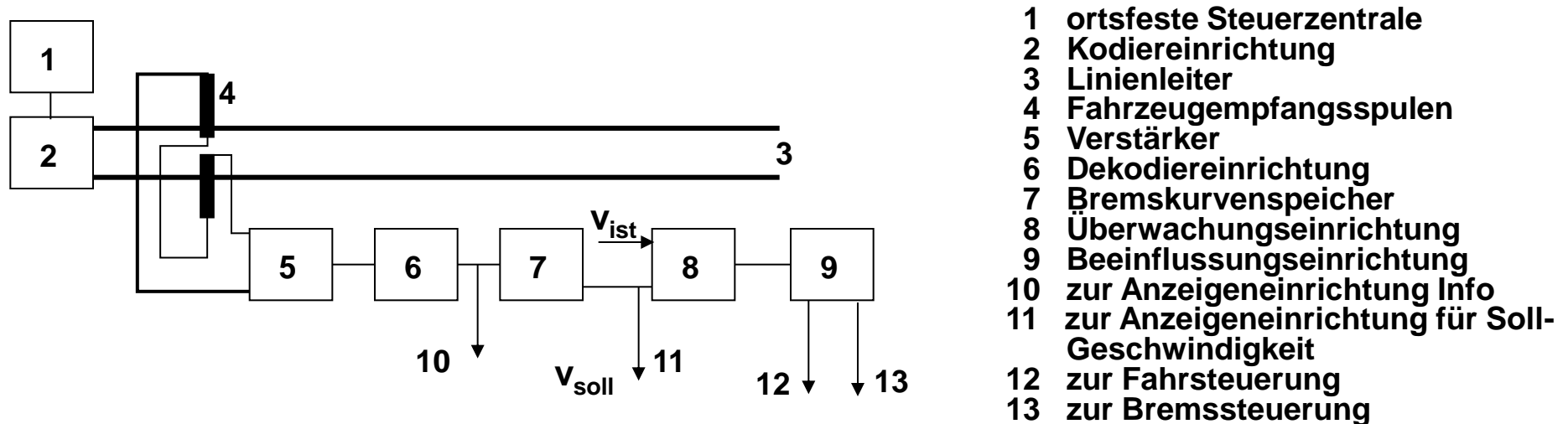


Bild 7.3 Prinzip einer linienförmigen Zugbeeinflussung

Vorschrift bei $v_{\max} > 160 \text{ km/h}$

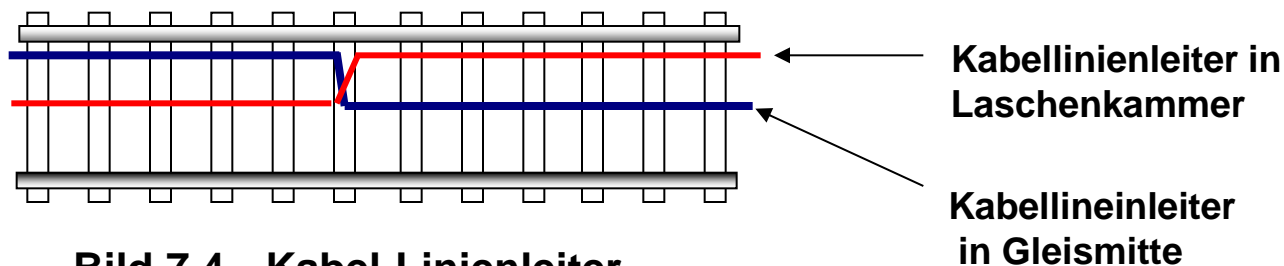


Bild 7.4 Kabel-Linienleiter mit Kreuzungsstelle

7 Überwachungseinrichtungen

Rückmeldetelegramm von der LZB

- Synchronisationszeichen
 - Gruppenkennung
 - Fahrtortangabe (Abschnitt)
 - Feinfahrtort (Wo innerhalb des Abschnittes)
 - Bremsart (Reise- oder Güterzug)
 - Bremsvermögen in Form einer Bremskurvennummer
 - Ist - Geschwindigkeit
 - Betrieb - und Diagnosemeldung
 - Telegrammsicherung
- und gegebenenfalls bei der Einfahrt in eine LZB- Strecke
- Höchstgeschwindigkeit
 - Zuglänge
 - Zug-Nummer
 - Lok-Baureihe und Serien-Nummer

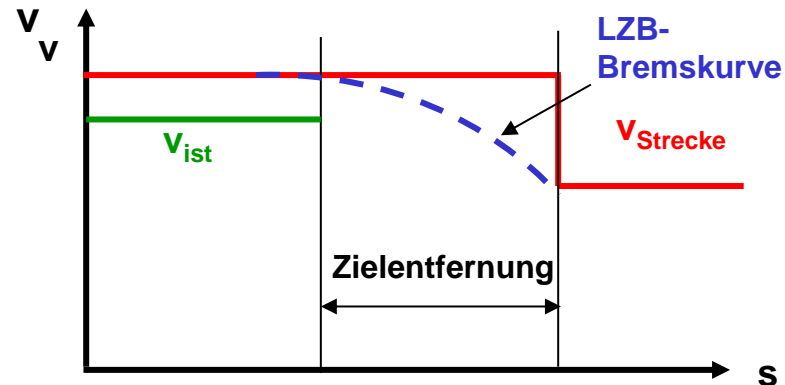


Bild 7.5 Führungsgrößen der LZB

Übertragene Führungsgrößen auf das Triebfahrzeug

- örtliche zulässige Geschwindigkeit
- Ziel-Entfernung bis zum nächsten Geschwindigkeits-Wechsel
- Ziel-Geschwindigkeit

7 Überwachungseinrichtungen

7.2.4 European Train Control System - ETCS

ETCS ist Bestandteil des neuen Betriebsleitsystem der europäischen Bahnen ERTMS (European Rail Traffic Management System)

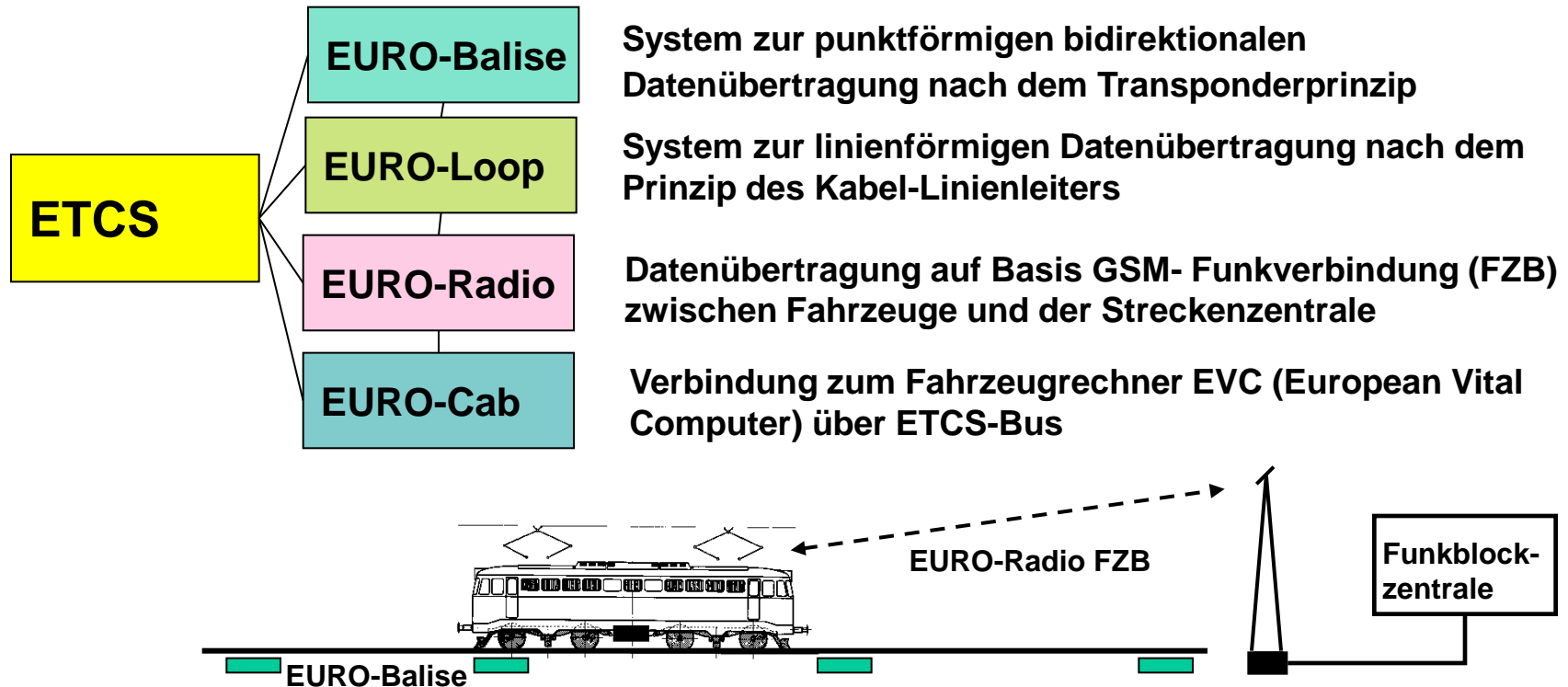


Bild 7.6 ETCS Level 3 EURO-Radio

7 Überwachungseinrichtungen

7.3 Leittechnik / Diagnosesysteme

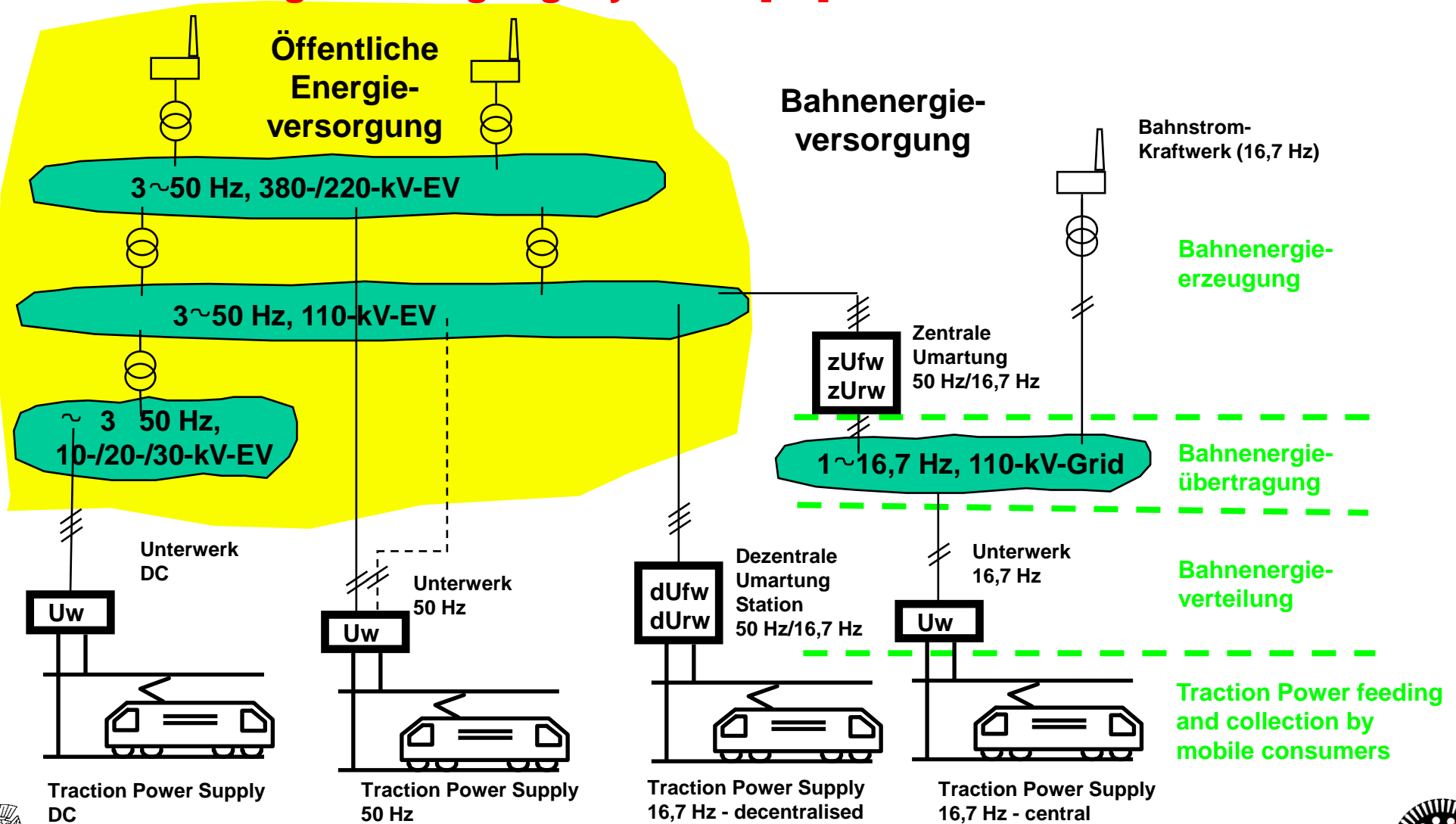
DAVID	Diagnose-, Aufrüst- und Vorbereitungsdienst mit integrierter Displaysteuerung
ZEUS	Zentrale Einrichtung zur Überwachung und Steuerung
ZSG	Zugsteuergeräte
ASG	Antriebssteuergerät
AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
HSM	Zentrale Bremssteuerung
LWL	Lichtwellenleiter
FIS	Fahrgastinformationssystem



- 8** **Bahnenergieversorgungssysteme**
- 8.1 Bahnenergieversorgungssysteme – Grundsätzlicher Aufbau
- 8.2 Fahrleitungsanlagen
- 8.3 Schaltanlagen (Unterwerke / Kuppelstellen) in
AC-Bahnenergieversorgungssystemen
- 8.4 Probleme der Erdung und Rückstromführung bei
Wechselstrombahnen

8 Bahnenergieversorgungssysteme

8.1. Bahnenergieversorgungssysteme [96]



Impedanzen von Oberleitungen

Gleichstrombahnen:

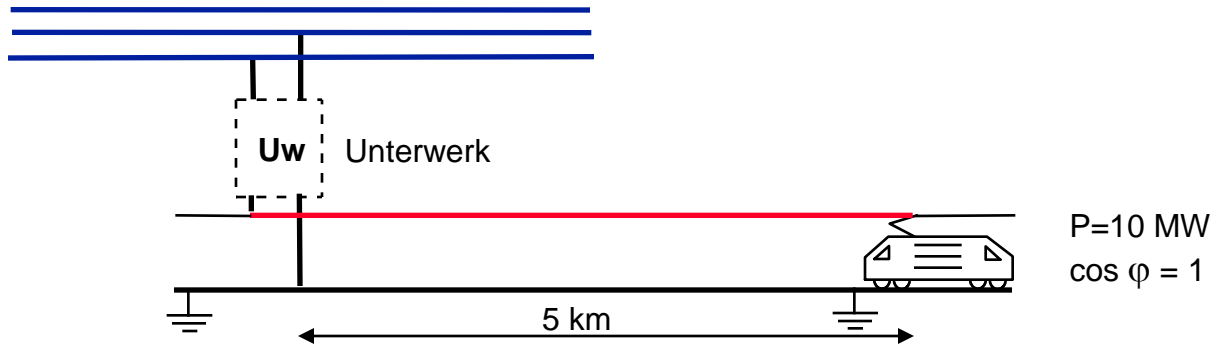
Schleifenimpedanz als Summe der Widerstände paralleler Fahr- und Verstärkungsleitungen und des wirksamen Gleiswiderstandes einschließlich paralleler Rückleiter

Wechselstrombahnen:

Wirksame Schleifenimpedanz durch mehrfache magnetische und galvanische Kopplungen aller Leiter einer Fahrleitungsanlage im Zusammenwirken mit den Leitern der Rückleitungsanlage sowie der Erde

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Vergleich der elektrischen Parameter



Bahnstromsystem	Fahrzeugstrom		Impedanz der Oberleitung $\underline{z} = r + jx$	Spannungsfall und Leistungsverlust entlang der Oberleitung über 5 km		
	U_n	$P/(U \cdot \cos \varphi)$ I_{Tfz}		ΔU	P_V	$\Delta U/U_n; P_V/P$
DC	1,5 kV	6.670 A	0,03 Ω /km	1.000 V	6.530 kW \cong 65,0 %	
DC	3 kV	3.330 A	0,03 Ω /km	500 V	1.660 kW \cong 17,0 %	
AC 16.7 Hz	15 kV	665 A	(0,06 + j 0,08) Ω /km	200 V	130 kW \cong 1,3 %	
AC 50 Hz	25 kV	400 A	(0,07 + j 0,23) Ω /km	145 V	55 kW \cong 0,6 %	

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk (Beispiele)

$$a_{UwZ} = \frac{a_{SZ}}{\eta_{Fl}}$$

Tabelle 3.1. Anhaltswerte für den spezifischen Energiebedarf a_{UZ} verschiedener Verkehrsmittel (ab Unterwerk)

Verkehrsmittel (Zugart)	$\frac{Wh}{t \cdot km}$	$\frac{kJ}{t \cdot km}$
D-Zug	25... 30	90...110
E-Zug	30... 35	110...125
P-Zug	35... 40	125...145
G-Zug	18... 25	65... 90
S-Bahn	40... 80	145...290
U-Bahn	50... 80	180...290
Straßenbahn		
- ET (Gotha)	60... 70	215...250
- T4D	120...150	430...540
- Pulssteller mit Netzbremse	≈ 100	≈ 360
Obus	100...120	360...430
Mittelwerte ab Unterwerk		
- DR	22... 24	
- DB	26... 28	
- SŽD	12... 14	

Quelle: [23]



Strombelastbarkeit von Oberleitungen

Dauerstrombelastbarkeit

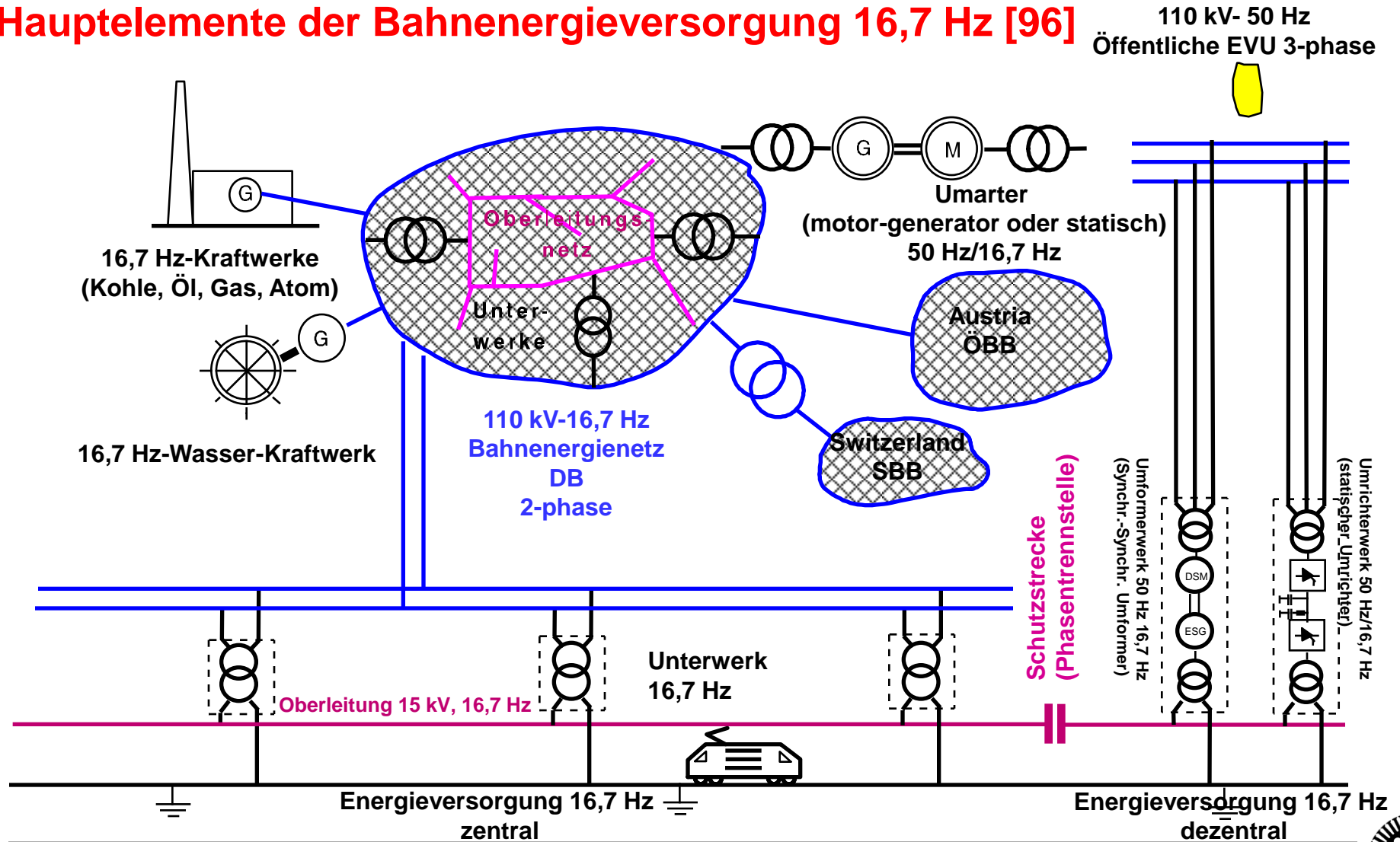
Strom I_D , der bei einer Umgebungstemperatur dauernd fließen darf, wobei das schwächste Glied der Oberleitung das thermische Gleichgewicht (zul. Endtemperatur, z.B. 70°C) erreicht

Kurzschlussstrombelastbarkeit

Strom I_K , der bei einer Umgebungstemperatur kurzzeitig (z.B. 60ms) fließen darf, wobei das schwächste Glied der Oberleitung seine kurzzeitig zulässige Endtemperatur erreicht (z.B. 500°C, Hänger BzII)

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Hauptelemente der Bahnenergieversorgung 16,7 Hz [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Bahnenergieversorgung 16,7 Hz der DB [96]

elektrisch betriebenes Streckennetz 15-kV-Oberleitungsnetz	18.800 km
Unterwerke	ca. 155
dezentrale Umformerwerke	19
110-kV-Bahnstromleitungsnetz Trassenlänge	ca. 7.300 km

Stand 2002

Prozentualer Anteil bei der Erzeugung von Bahnstrom in Deutschland

Kraftwerkstyp	Installierte Leistung	Erzeugte Energie
<u>Dampfkraftwerke</u>	42,2 %	66,0 %
<u>Wasserkraftwerke</u>	11,0 %	10,0 %
<u>Umformer</u>	34,3 %	14,6 %
<u>Umrichter</u>	11,9 %	9,4 %
Gesamt	3,2 Gigawatt	11 Terawattstunden/Jahr



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Bahnenergieversorgung 16,7 Hz der DB - Das 110-kV-16,7-Hz-Netz [96]



Verbund mit SBB

Verbund mit ÖBB



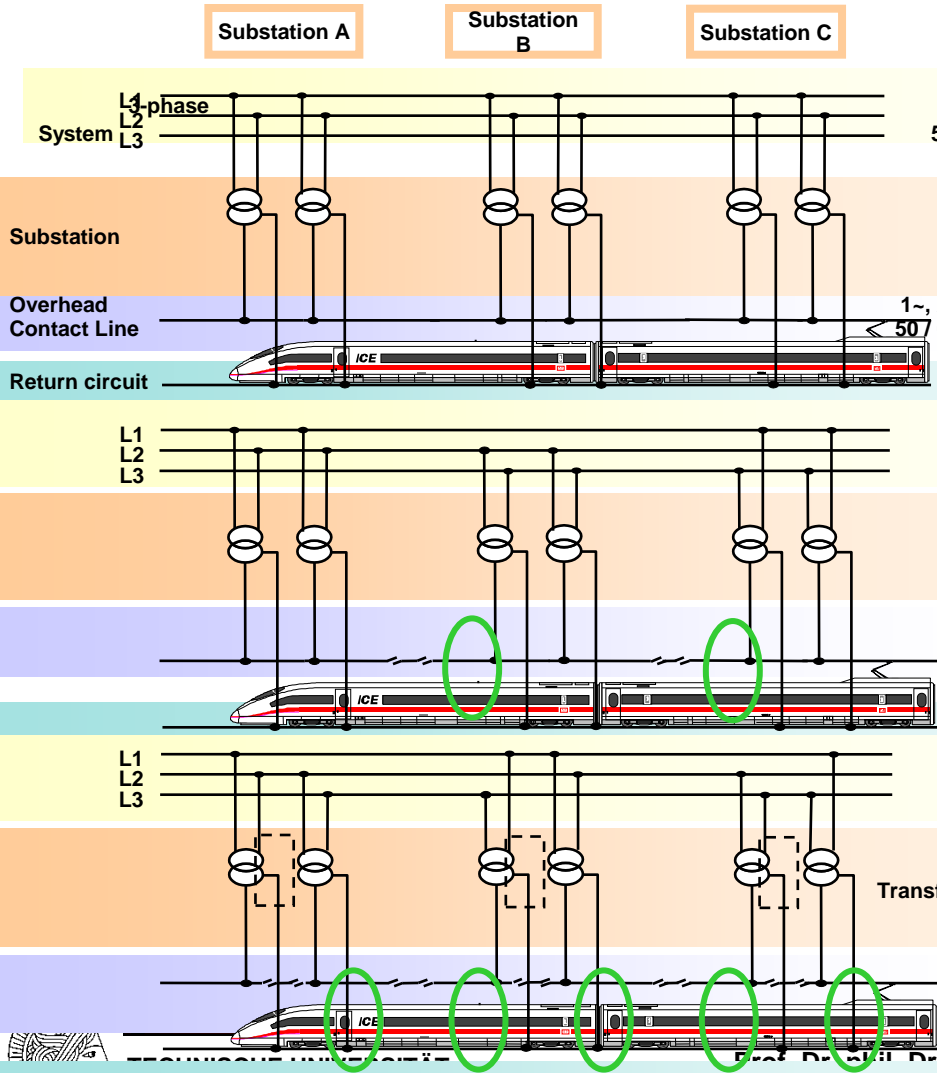
T
D



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Unterwerksanschluss an Hochspannungsnetz für AC-Traktion [96]

Überblick/Vorteile/Nachteile



Vorteile:

- Einsatz einfacher Einphasentransformatoren
- Durchkupplung der Oberleitung möglich (Niedrige Spannungsfälle in der Oberleitung)

3~
110...400 kV
50 / 60 Hz

Nachteile:

- Hohe Unsymmetrie im 3-Phase-Netz

Nur im 16,7 Hz-System anwendbar (50-Hz-EVU verbieten die Anwendung)

Vorteile:

- niedrigere Unsymmetrie im Drehstromnetz entlang der Strecke
- Einsatz einfacher Einphasentransformatoren

Nachteile:

- Phasentrennstelle zwischen Unterwerken erforderlich

Meist realisierte Schaltung weltweit (z.B. Madrid-Sevilla)

Vorteile:

- sehr niedrige Unsymmetrie im Drehstromnetz (Kompensation am Unterwerk und entlang der Strecke)

Nachteile:

- Doppelsammelschienensysteme im Unterwerk
- Komplizierte V/V-Transformatoren oder Verdopplung der Anzahl der Transformatoren mit schlechter Auslastung
- Phasentrennstelle zwischen Unterwerken erforderlich, zusätzlich am Unterwerk

Typisch in China für 2x25-kV-Systeme in High Speed und sehr oft auch in 1x25-kV-Systemen



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Typische Unterwerksabstände

- ➔ **Städtischer Nahverkehr** **750V (600V) Gleichstrom**
ca. 1,5 bis 6 km
- ➔ **Fernbahnen** **1500V und 3000V Gleichstrom**
max. 20 km
- ➔ **Fernbahnen** **15kV 16,7 Hz und 1*25kV 50Hz**
ca. 20 bis 100 km
- ➔ **Fernbahnen** **2*25kV 50Hz**
ca. 40 bis 120 km
- ➔ **Fernbahnen** **1*50kV 50Hz**
ca. 150 km

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zur öffentlichen elektrischen Energieversorgung (EV)

- **Einpolig geerdeter Betrieb der Bahn**
- **Hohe Kurzschlusshäufigkeit in der Oberleitung**
- **Starke Belastungsschwankungen der Unterwerke**
- **Einphasige Lastentnahme aus dem EV-Netz (50 Hz)**
- **Hohe Blindleistung für konventionelle Fahrzeuge**
- **Ortsveränderlicher Verbraucher (Triebfahrzeug)**



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zur öffentlichen elektrischen Energieversorgung [96]

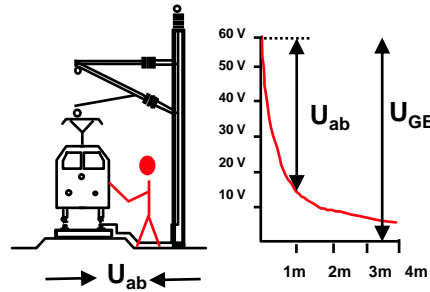
Einpolig geerdeter Betrieb

Kennzeichen: Stromrückführung durch Fahrschienen und Erdreich (im Nebenschluss)

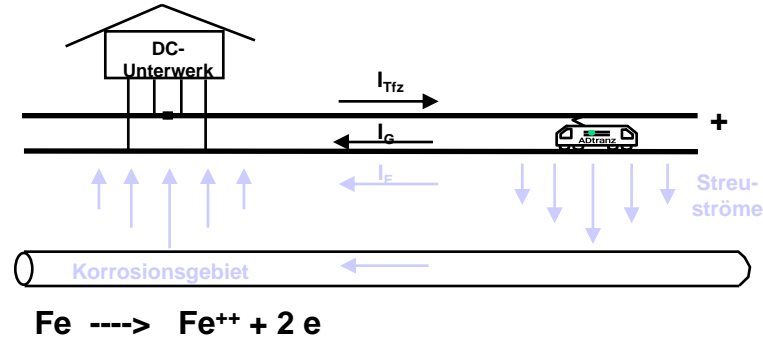
Konsequenzen für Bahnbetrieb:



Gleis-Erde-Spannungen zwischen Schienen und entfernter Erde



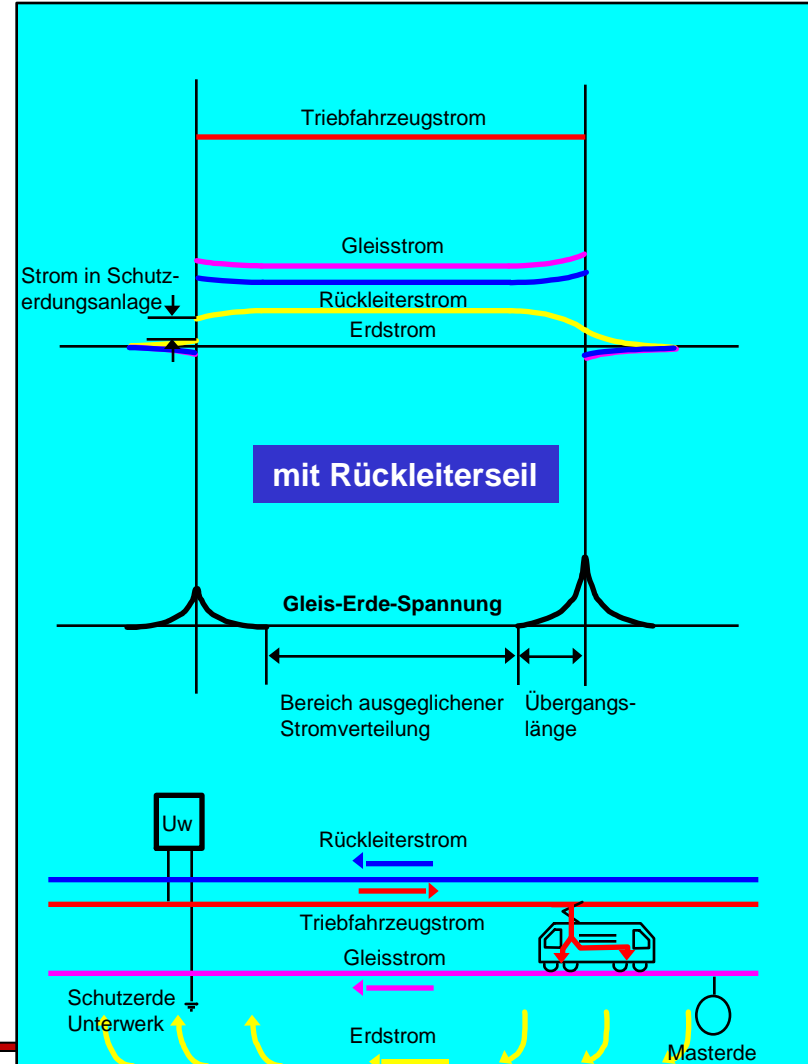
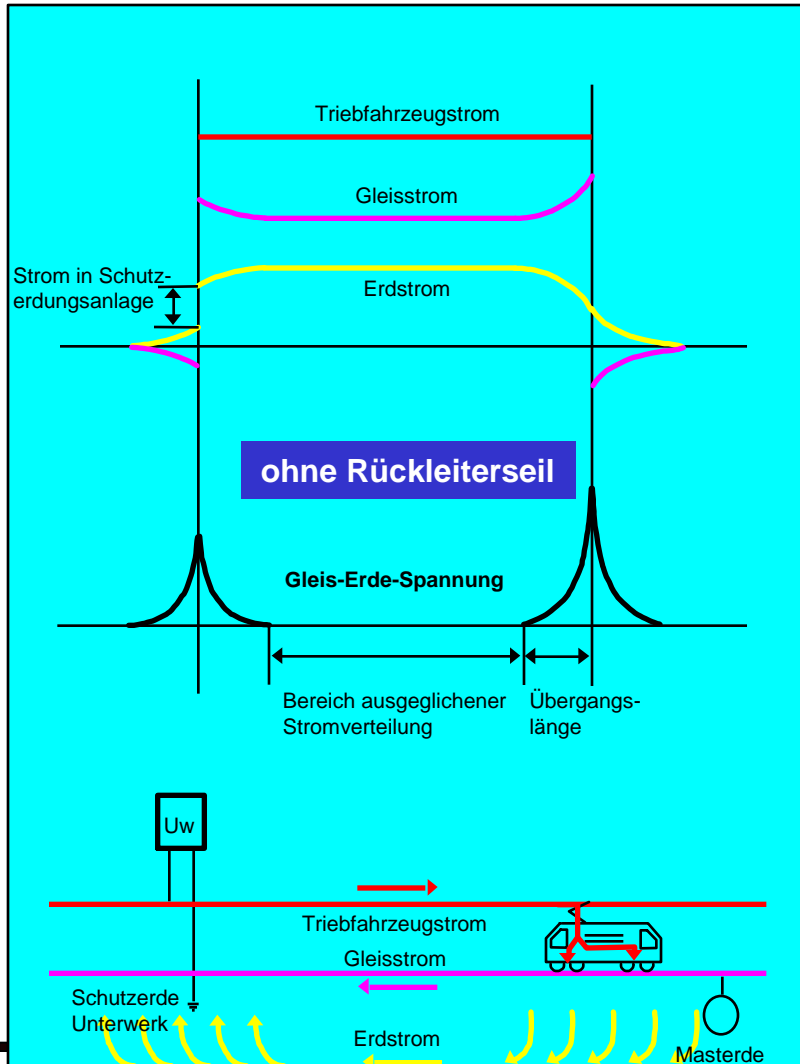
elektrolytische Korrosion durch Streuströme bei GS-Bahnen



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

Einpolig geerdeter Betrieb - Stromverteilung Gleis/Erddreich

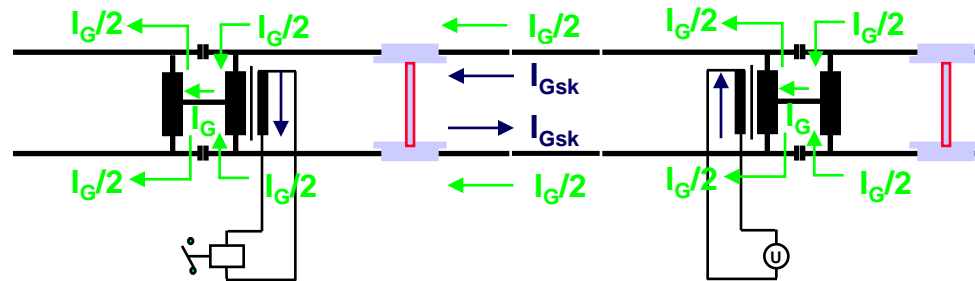


8 Bahnenergieversorgungssysteme

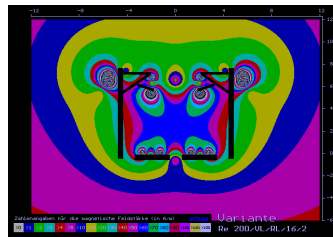
Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

Einpolig geerdeter Betrieb

➔ Beeinflussungen gleisgebundener Sicherungstechnik
Beispiel - zweischienig isolierter Gleisstromkreis



➔ hohe magnetische Feldstärken im Oberleitungsbereich [97]



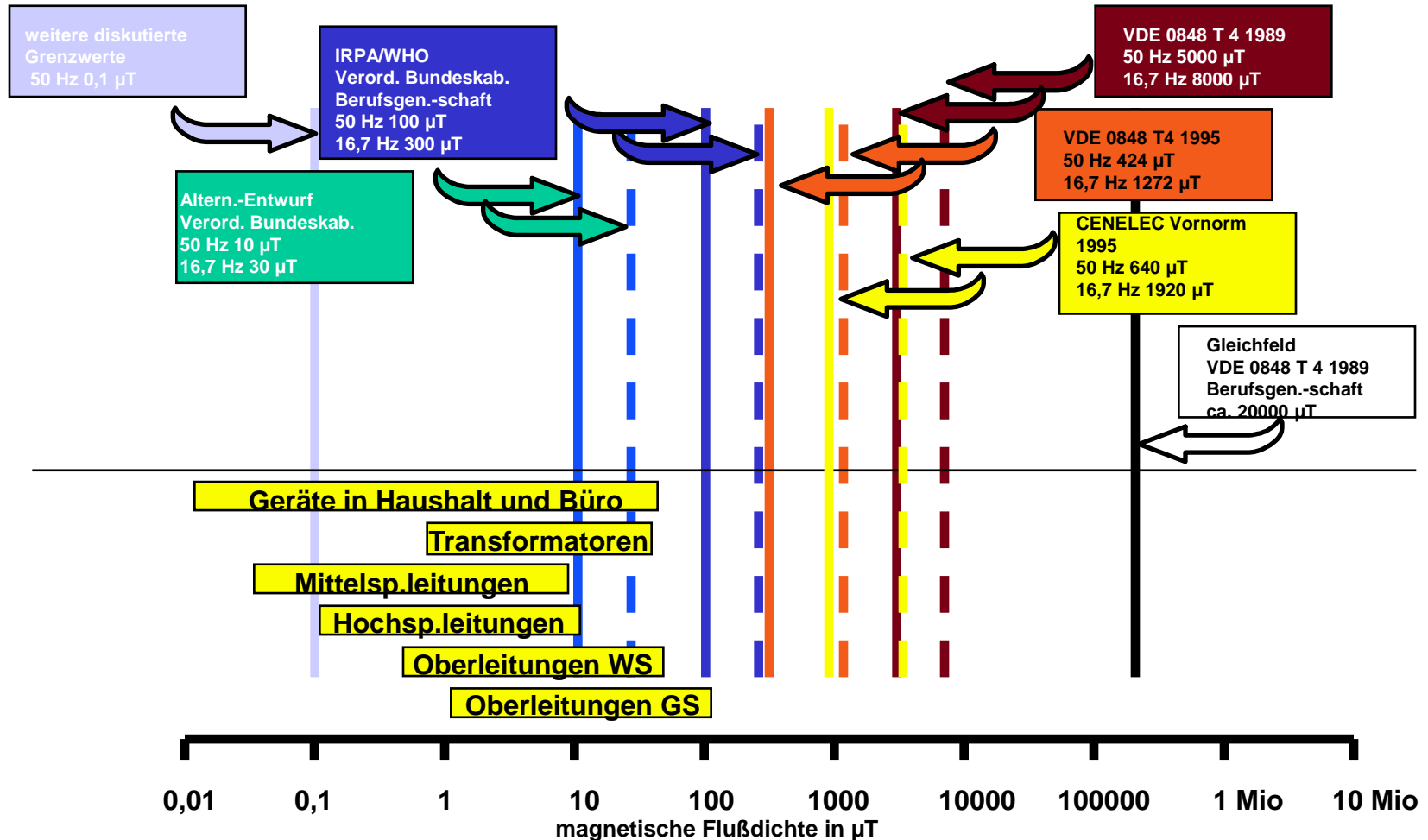
➔ hohe Beeinflussungsintensität auf benachbarte Stromkreise

- galvanische Kopplung
- induktive Kopplung
- kapazitive Kopplung

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

Grenzwerte für magnetische Felder



Grenzwerte (Normen und Empfehlungen) für magnetische Felder
im Vergleich zu praktischen Anlagenemissionen (dauernde Exposition von Personen)



8 Bahnenergieversorgungssysteme

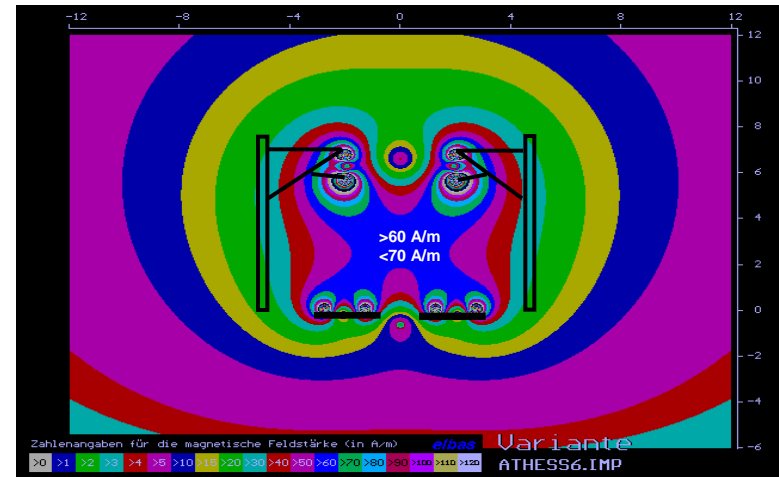
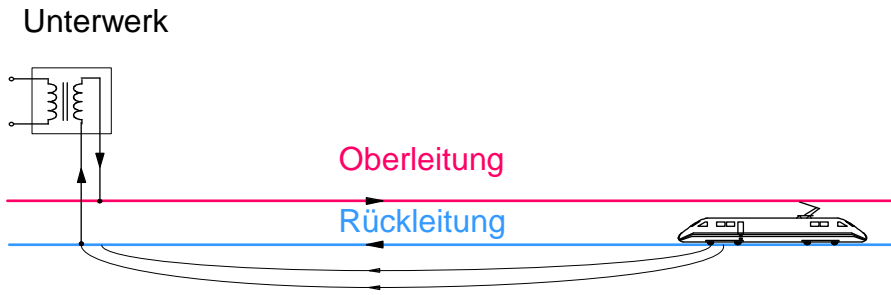
Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

Magnetische Felder im Bereich von Oberleitungen

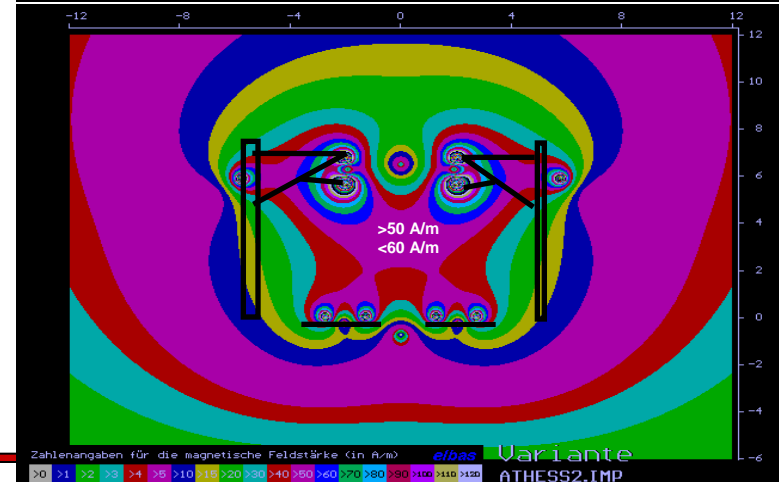
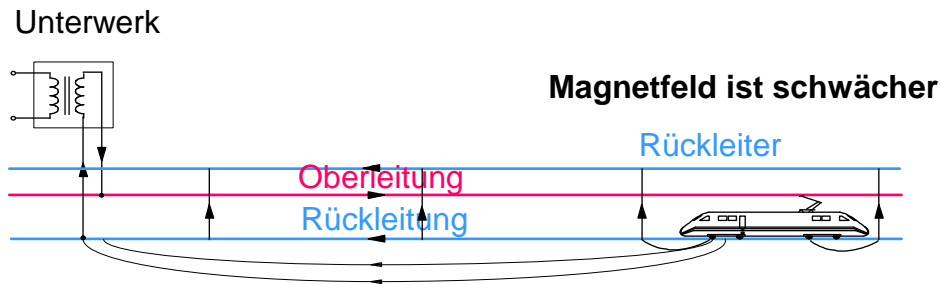
Magnetische Wechselfelder in Oberleitungsanlagen [97]

Strom in einem Gleis 500 A

Magnetfeld für „normales“ – 1x25-kV-System



Magnetfeld für 1x25-kV-System mit Rückleiter



8 Bahnenergieversorgungssysteme

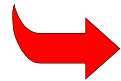
Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

Hohe Kurzschlusshäufigkeit

Hohe Kurzschlusshäufigkeit

Kennzeichen: ca. 1 Kurzschluss je km und Jahr (zweigleisige Strecke)
(EVU - 30 kV-Leitung ca. 0,02 Kurzschlüsse je km und Jahr)

Konsequenzen für Bahnbetrieb:



hohe Anlagenbeanspruchung (Kurzschlussfestigkeit der Oberleitung, Schaltmittel, Transformatoren)



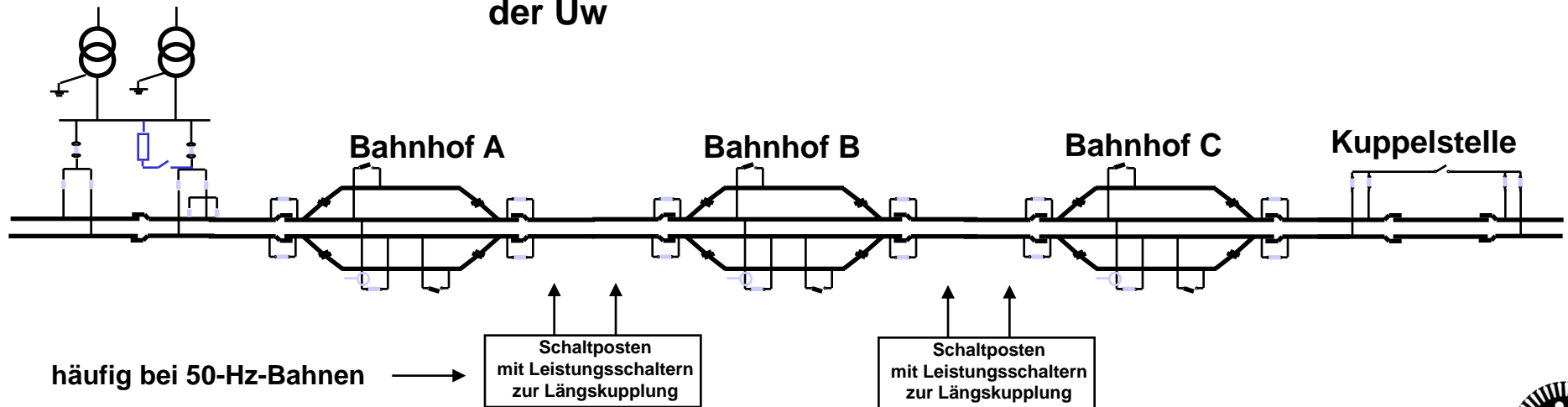
hohe Anforderungen an Fahrleitungsschutz



Wiedereinschalt- und Prüfautomatiken und Fehlerortung in Uw



Bildung von vielen Selektivabschnitten in Speiseabschnitten der Uw



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

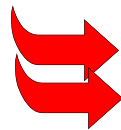
Hohe Belastungsschwankungen

Starke Belastungsschwankungen

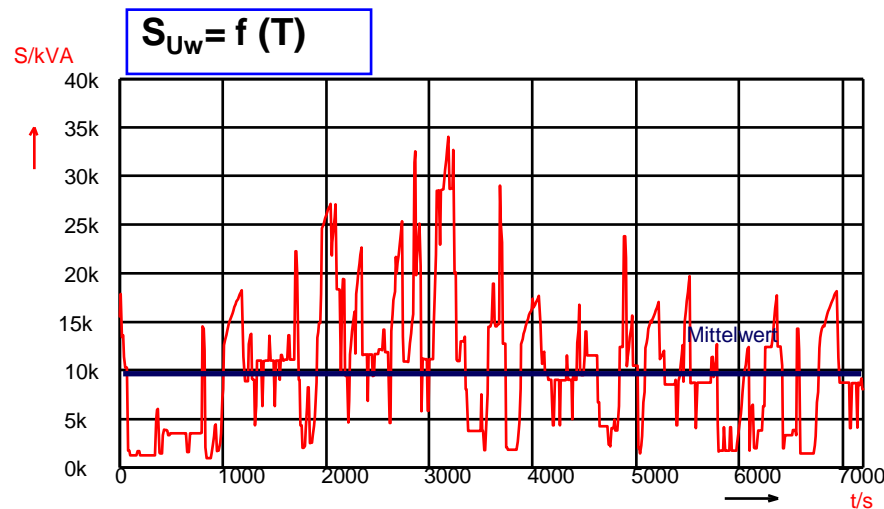
Kennzeichen:

Starke zeitlich schwankende Belastung

Konsequenzen
für Bahnbetrieb:



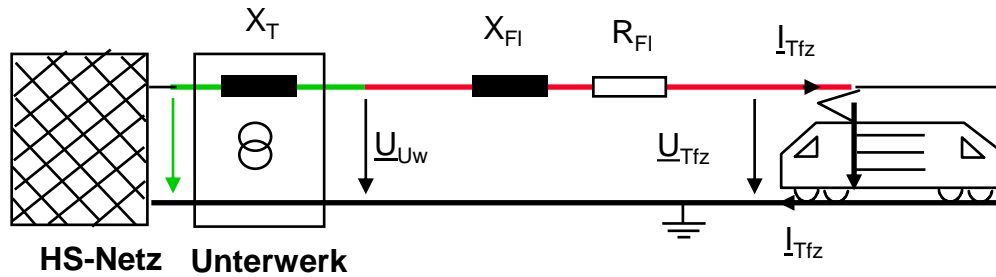
hohe Kurzzeitbelastbarkeit erforderlich
schlechte Auslastung der Betriebsmittel



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

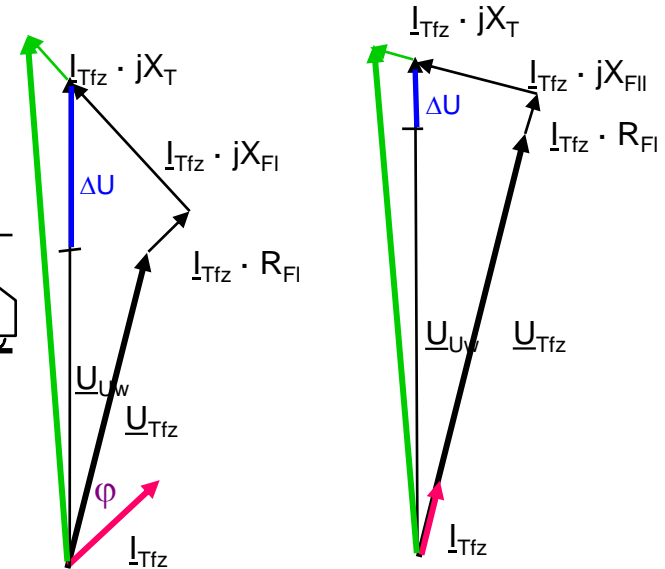
hoher Blindleistungsanteil konventioneller Technik



$$X_T = u_{kr} \cdot U_{Tr}^2 / S_{Tr}$$

$$X_{FI} = x_{FI}' \cdot l$$

$$R_{FI} = x_{FI}' \cdot l$$



$\cos \varphi = 0,85$

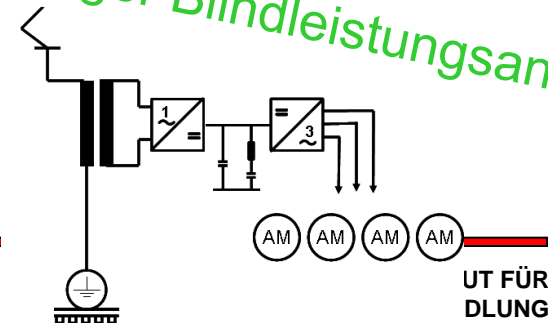
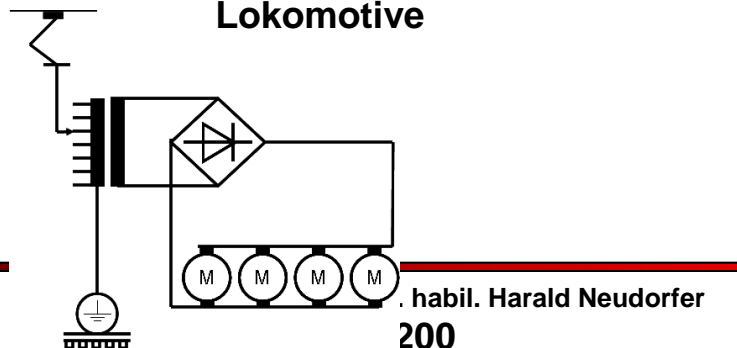
$\cos \varphi = 1$

Lokomotive mit Drehstromantrieb

Hoher Blindleistungsanteil

Gleichrichter-Lokomotive

Niedriger Blindleistungsanteil



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Besonderheiten im Vergleich zu EV [96]

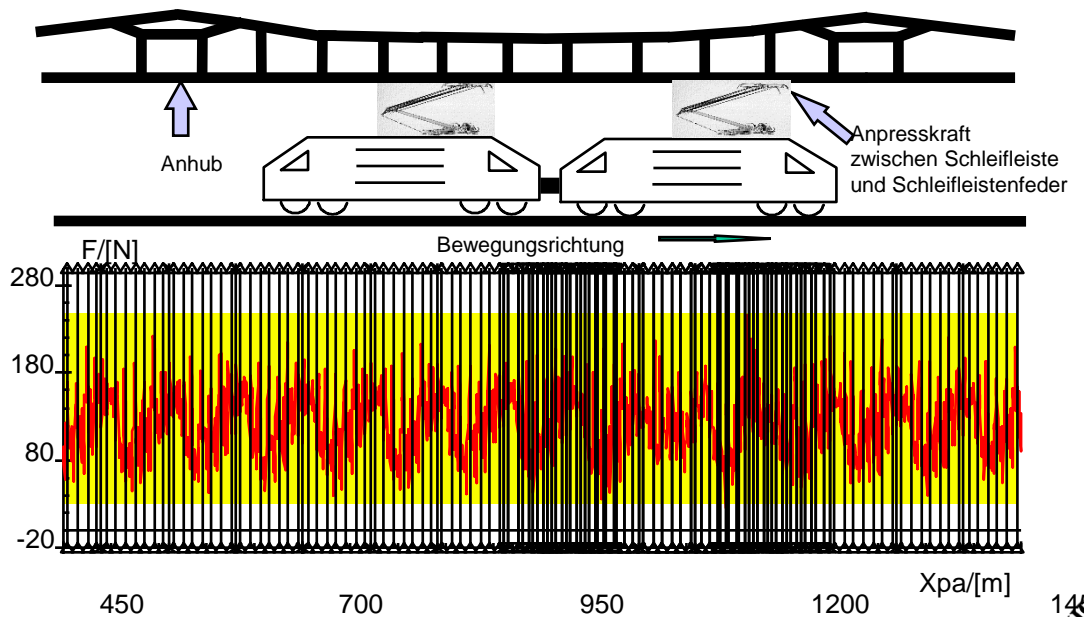
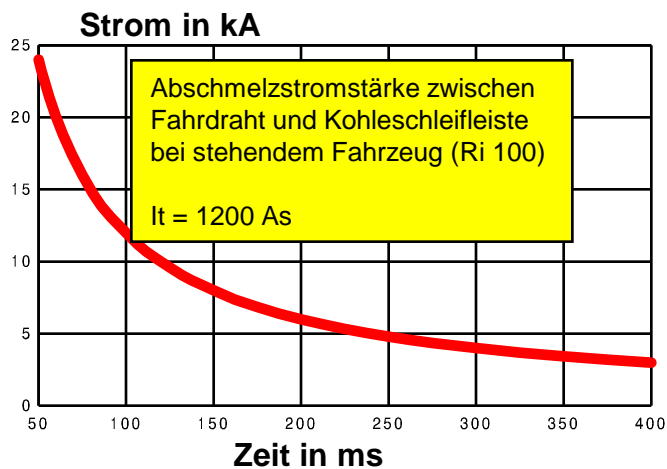
Ortsveränderlicher Verbraucher

Ortsveränderlicher Verbraucher

Kennzeichen: Stromabnahme durch Stromabnehmer auf bewegten Fahrzeug

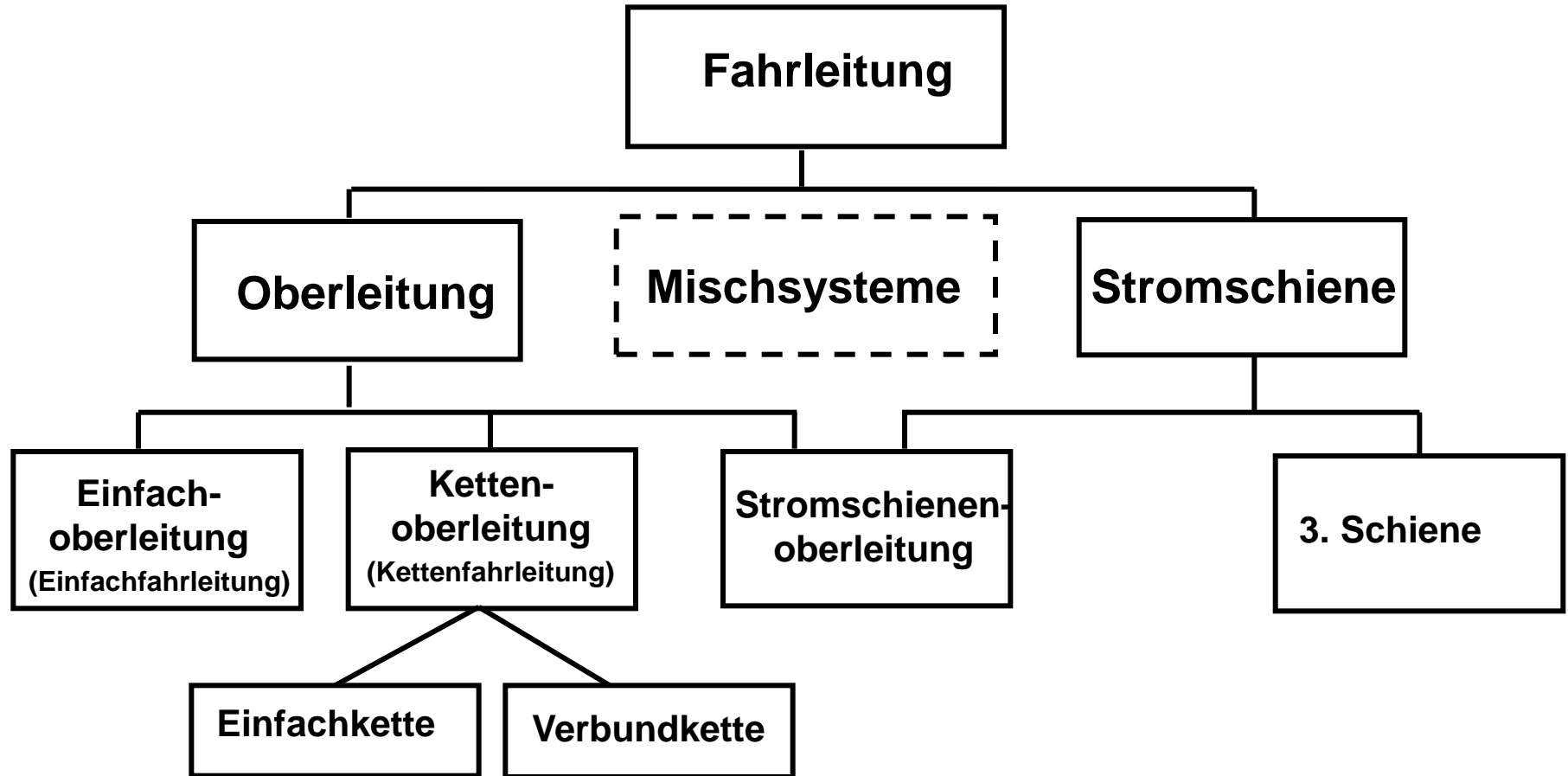
Konsequenzen für Bahnbetrieb:

Zusammenwirken Stromabnehmer - Fahrdrabt mit hoher Güte bei allen Betriebszuständen [97]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Fahrleitungssysteme elektrischer Bahnen



Impedanzen von Oberleitungen

Wechselstrombahnen, Frequenz 16,7 Hz

2-gleisige Strecke

Fahrdraht - 10 %

Schienen - 15%, UIC 60

mit Verstärkungsleitung Al 240

mit Rückleiterseil Al 240

$$\text{Re 330: } \underline{Z} = (0,0504 + j 0,0460) \Omega/\text{km} = (0,0682 e^{j 42,4^\circ}) \Omega/\text{km}$$

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Impedanzen von Oberleitungen

Gleichstrombahnen

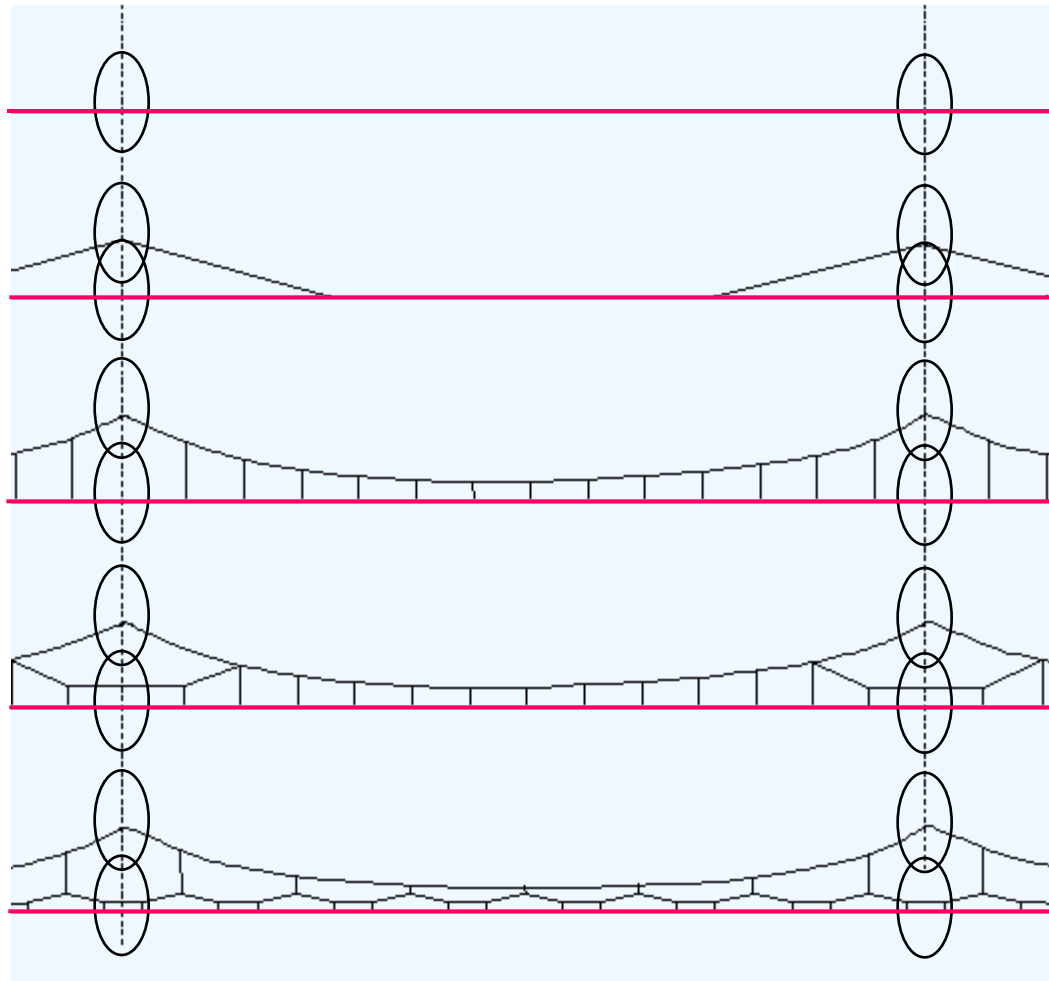
Umgebungstemperatur 20°C, keine Abnutzung

1 FD Ri 100	178,6 mΩ/km
1 FD Ri 120 + 1 TS Cu 150	66,1 mΩ/km
Weicheisenstromschiene DIN 43156	23,1 mΩ/km
Aluminiumverbundstromschiene	6,8 mΩ/km
1 Fahrschiene UIC 60	28,9 mΩ/km
1 Fahrschiene S 49	35,3 mΩ/km
1 Fahrschiene Ri 60	28,8 mΩ/km



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Oberleitung [96]



Einfachfahrleitung

Einfachfahrleitung
mit Beiseil

Einfachkettenwerk

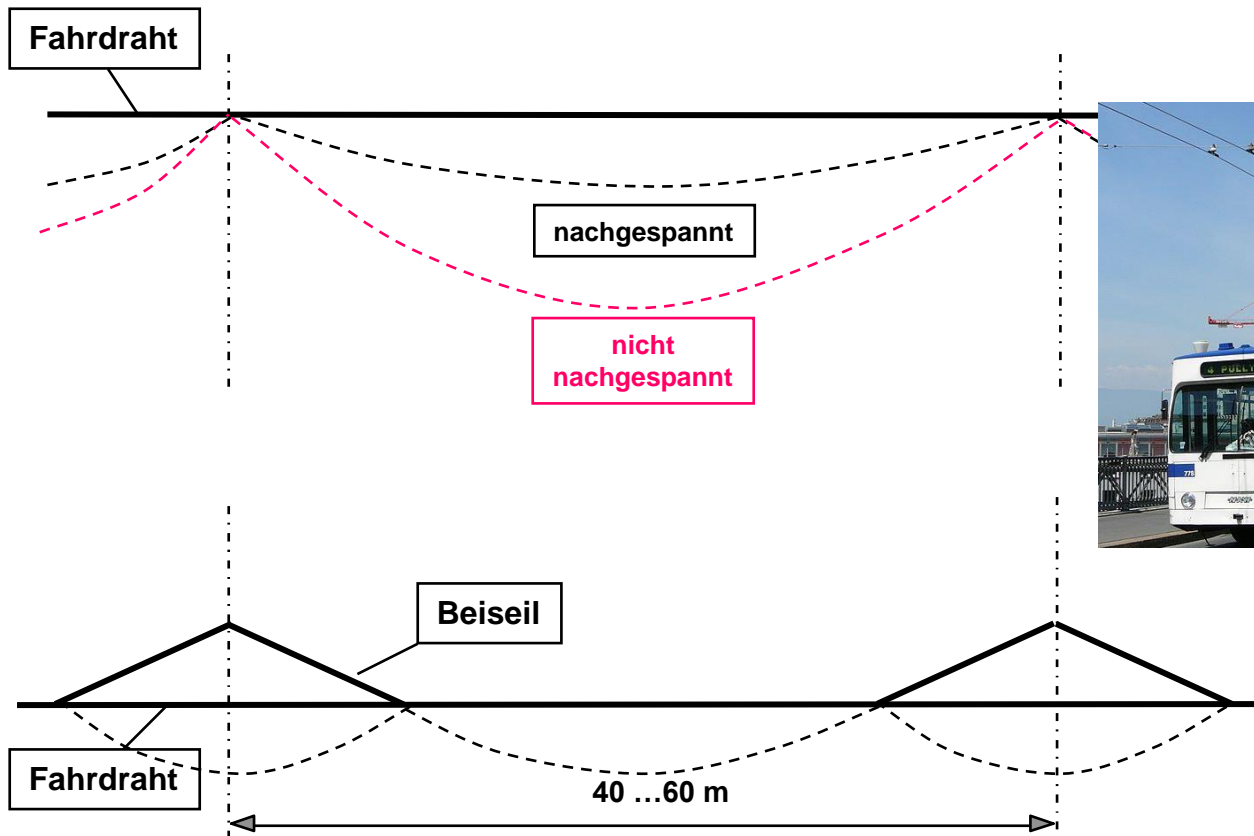
Einfachkettenwerk
mit Y-Beiseil

Verbundkettenwerk



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Einfach-Oberleitung [96]



Beispiel
O-Bus



Anwendung
für Nebenstrecken
 $v < 80 \text{ km/h}$

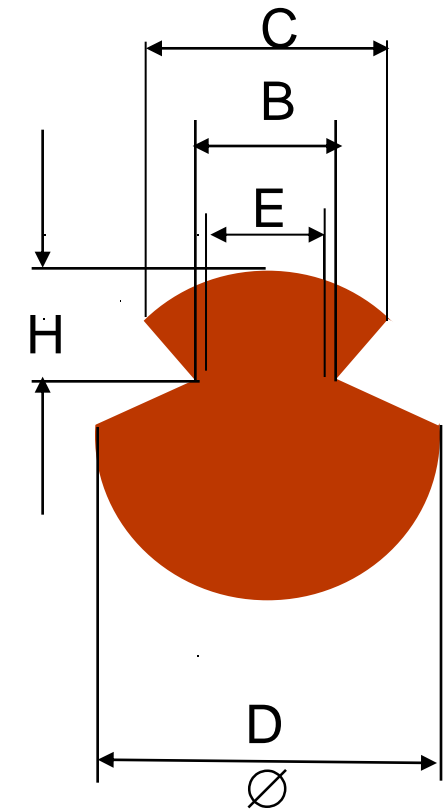


8 Bahnenergieversorgungssysteme

Rillen-Fahrdraht [96]

Fahrdraht 120 Hauptabmessungen in mm

	D	H	B	E	C
Nach DIN 43140 (alt)	13,2	4,0	5,6	5,16	8,6
Nach EN 50149 AC	13,2	4,0	5,6	5,16	<10
Nach EN 50149 BC	12,85	4,3	6,92	6,5	<10
Chinesischer Fahrdraht	12,9	4,35	7,24	6,8	9,75



Winkel und Radien im Schwalbenschwanz sind identisch

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Dauerstrombelastbarkeit von Oberleitungen (1 Kettenwerk) [96]

Frequenz 16,7 Hz
FD-Abnutzung 20%
Umgebungstemperatur 40°C
zul. Endtemperatur 70°C (Re 330 80°C)
Windgeschwindigkeit 1m/s

Re 200: 570 A

Re 250: 670 A

Re 250 mit VL: 1270 A

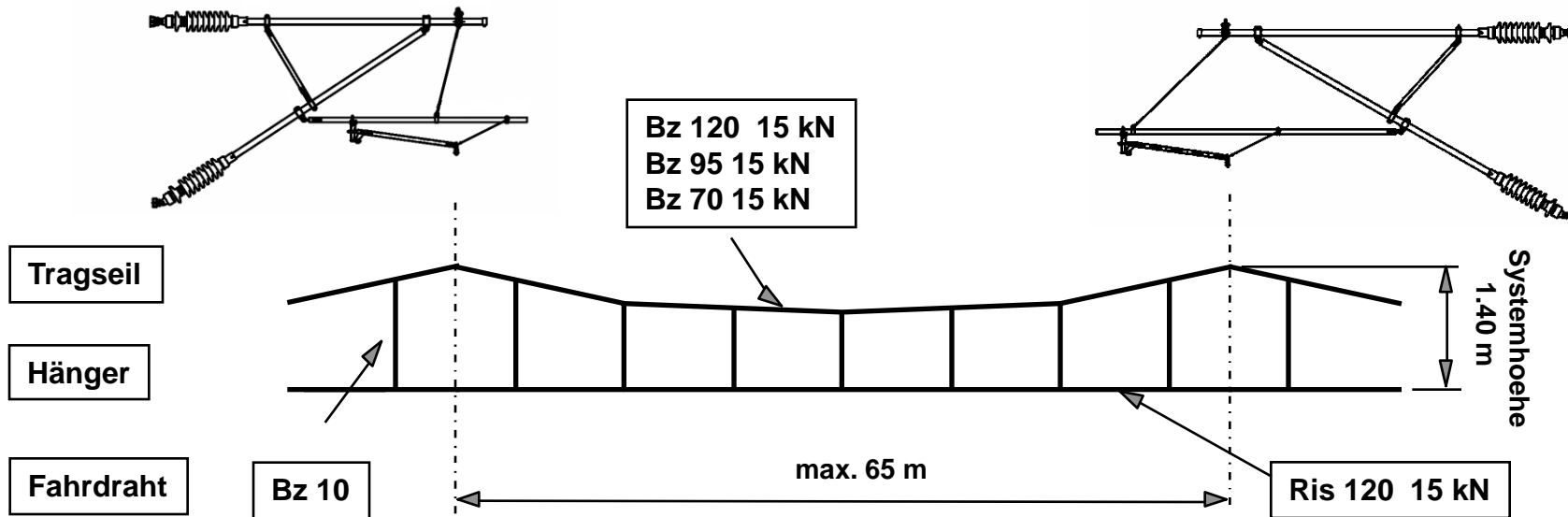
Re 330: 850 A

Re 330 mit VL: 1425 A



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Einfachkettenwerk [97]

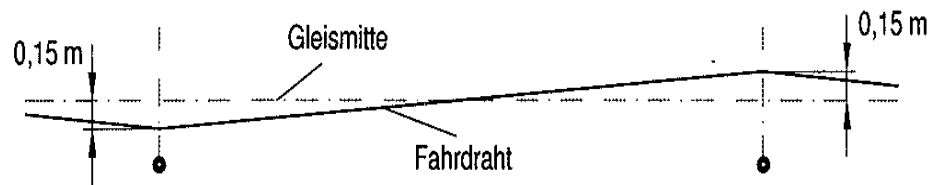
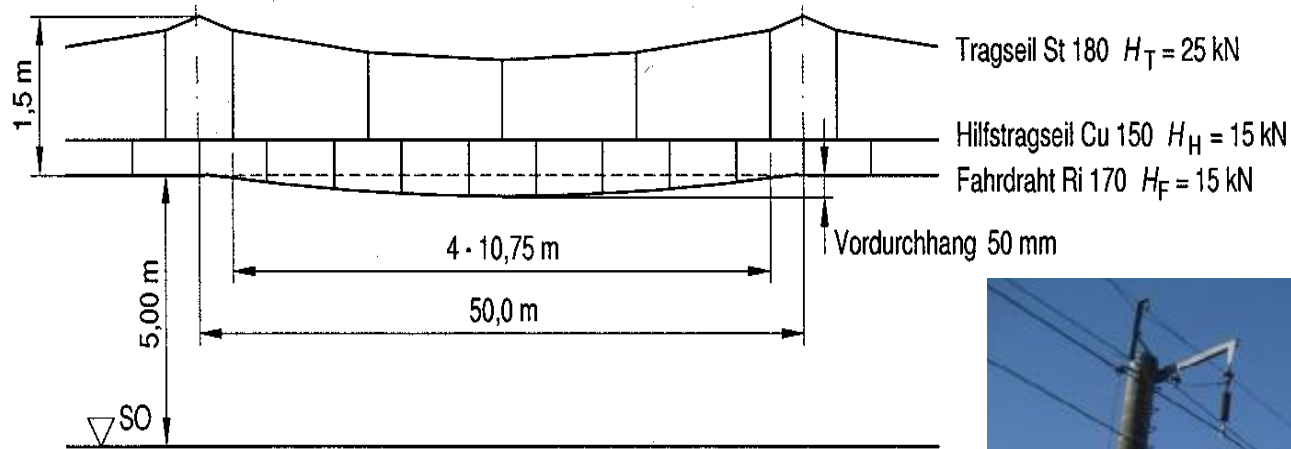


Nachspannlaenge: 2 x 800 m
Temperaturbereich: -30°C ... +40°C (Qinhuangdao-Shenyang)
-25°C ... +40°C (Tianjin-Qinhuangdao)



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Verbundkettenoberleitung JNR [97]

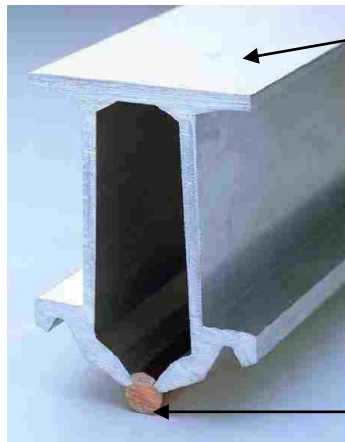
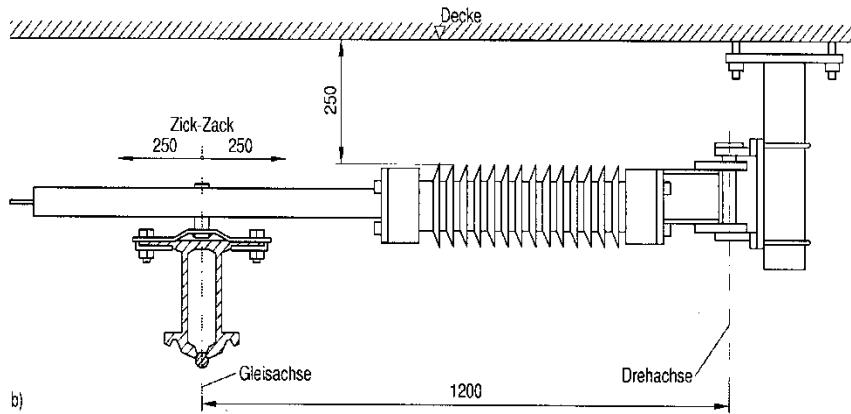


Bauart der Oberleitung auf der Tokaido-Hochgeschwindigkeitsstrecke.



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Stromschienenoberleitung (Deckenstromschiene) [97]



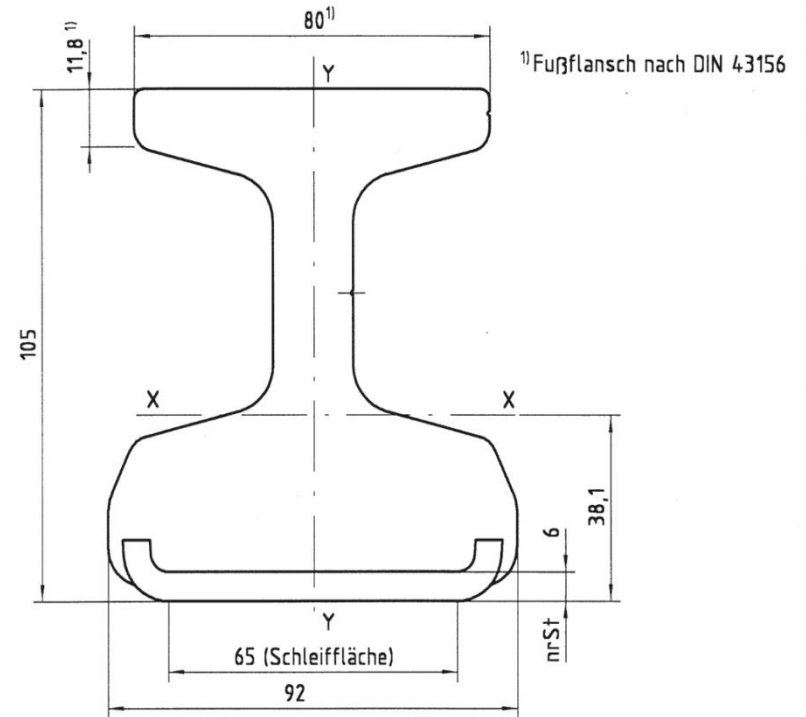
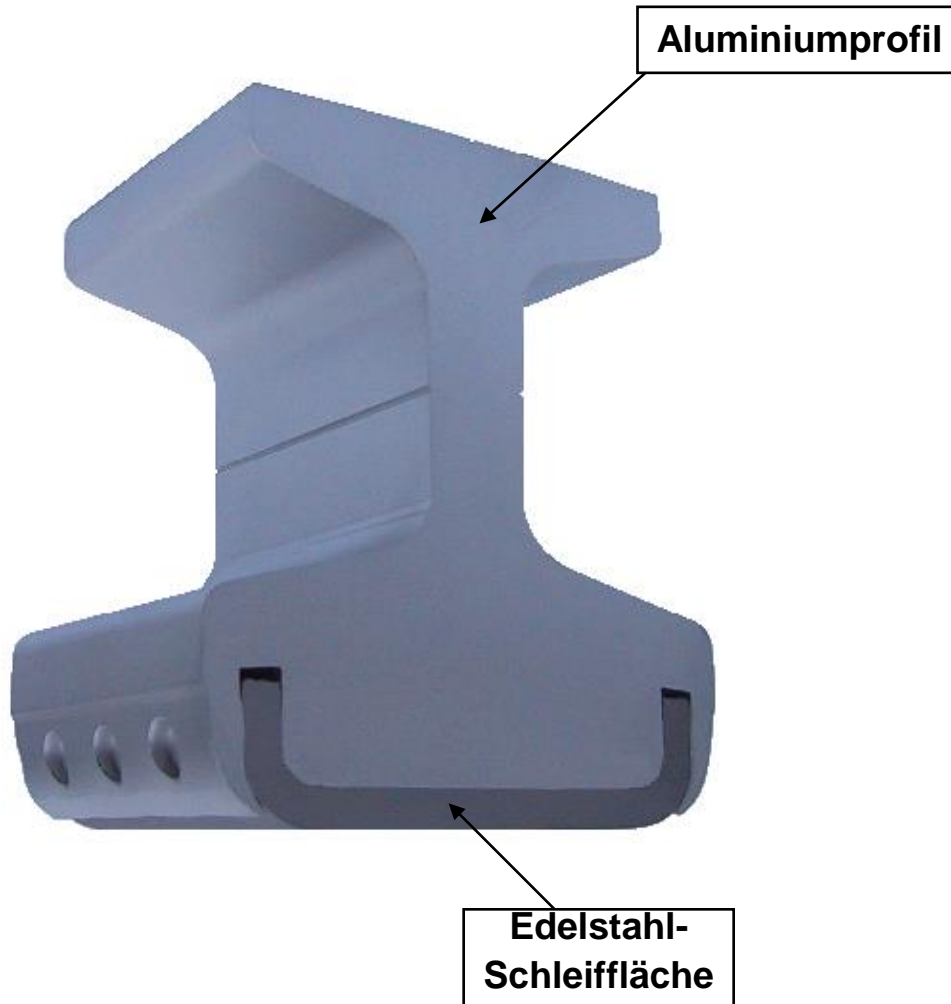
Aluminiumprofil

Rillenfahrdraht



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Stromschiene 3. Schiene, Aluminium-Verbundstromschiene [97]



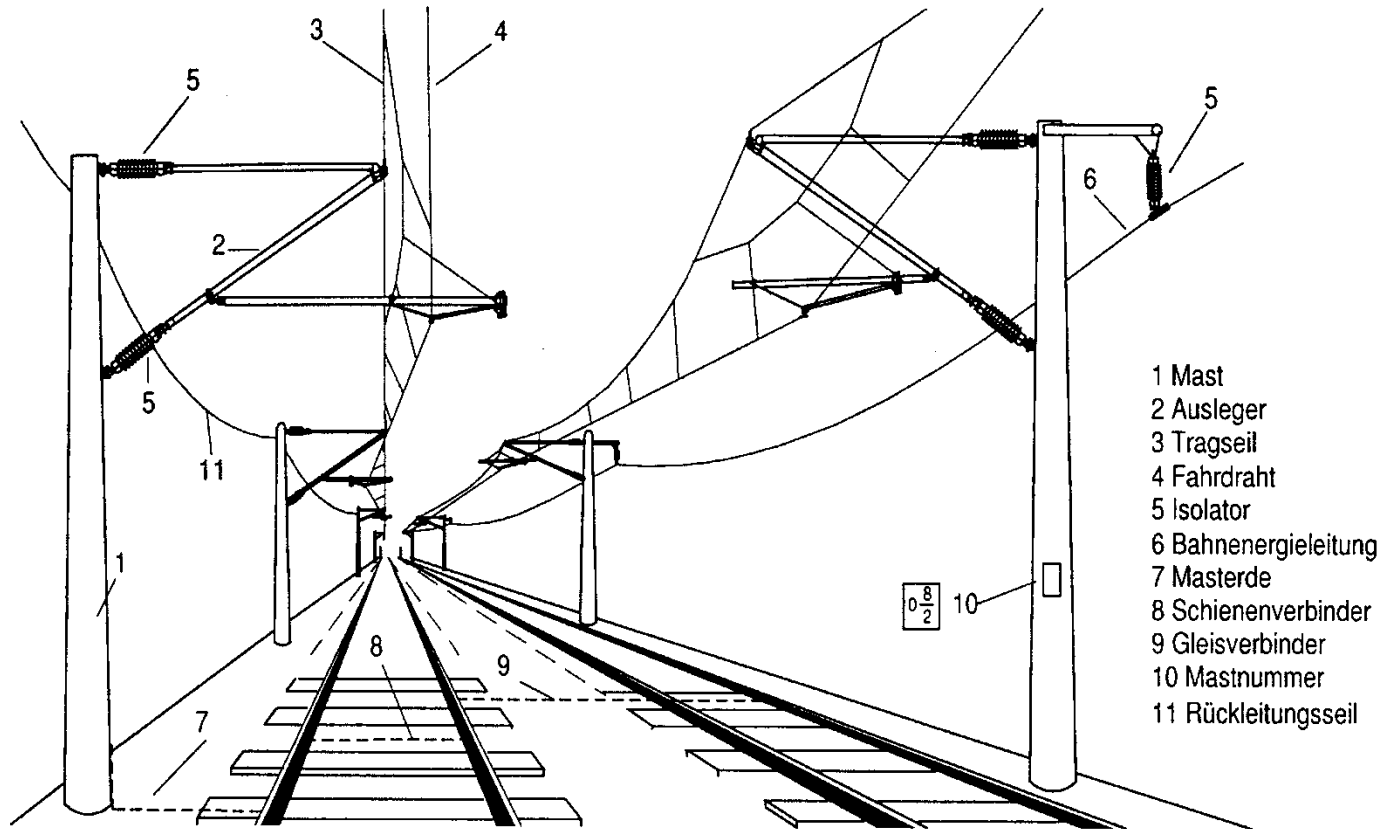
Profildaten, Werkstoffeigenschaften			elektrische Eigenschaften			
Querschnittfläche, gesamt	[mm ²]	5452	Leitfähigkeit bei 20° C	[m/Ωmm ²]	30,3	
Querschnittfläche (Al)	[mm ²]	4912	Spezif. Widerstand bei 20°C	[Ωmm ² /m]	0,033	
längenbezogene Masse	[kg/m]	17,201	Widerstandstemperaturkoeff.	[K ⁻¹]	0,0038	
Trägheitsmoment Jx *	[cm ⁴]	804	Widerstand bei 20°C	[mΩ/km]	6,72	
Trägheitsmoment Jy *	[cm ⁴]	320	Dauerstrombelastbarkeit bei Umgebungstemp. 40°C + Leitererwärmung von 20 K			
elast. Durchbiegung um X-Achse, Stützweite 6m, (Durchlaufträger)	[mm]	< 3	[A]	2828	3201	3561 3781
Brinellhärte (Al)	[HB]	85	Windgeschwindigkeit	[m/s]	0,3	0,6 1,0 1,3
Brinellhärte (St)	[HB]	130...170	Erwärmungszeitkonstante	[s]	3950	3083 2491 2211
Längenausdehnungskoeffizient	[10 ⁻⁶ /K]	20,4				

*Stahlquerschnitt ist auf äquivalenten Aluminiumquerschnitt umgerechnet



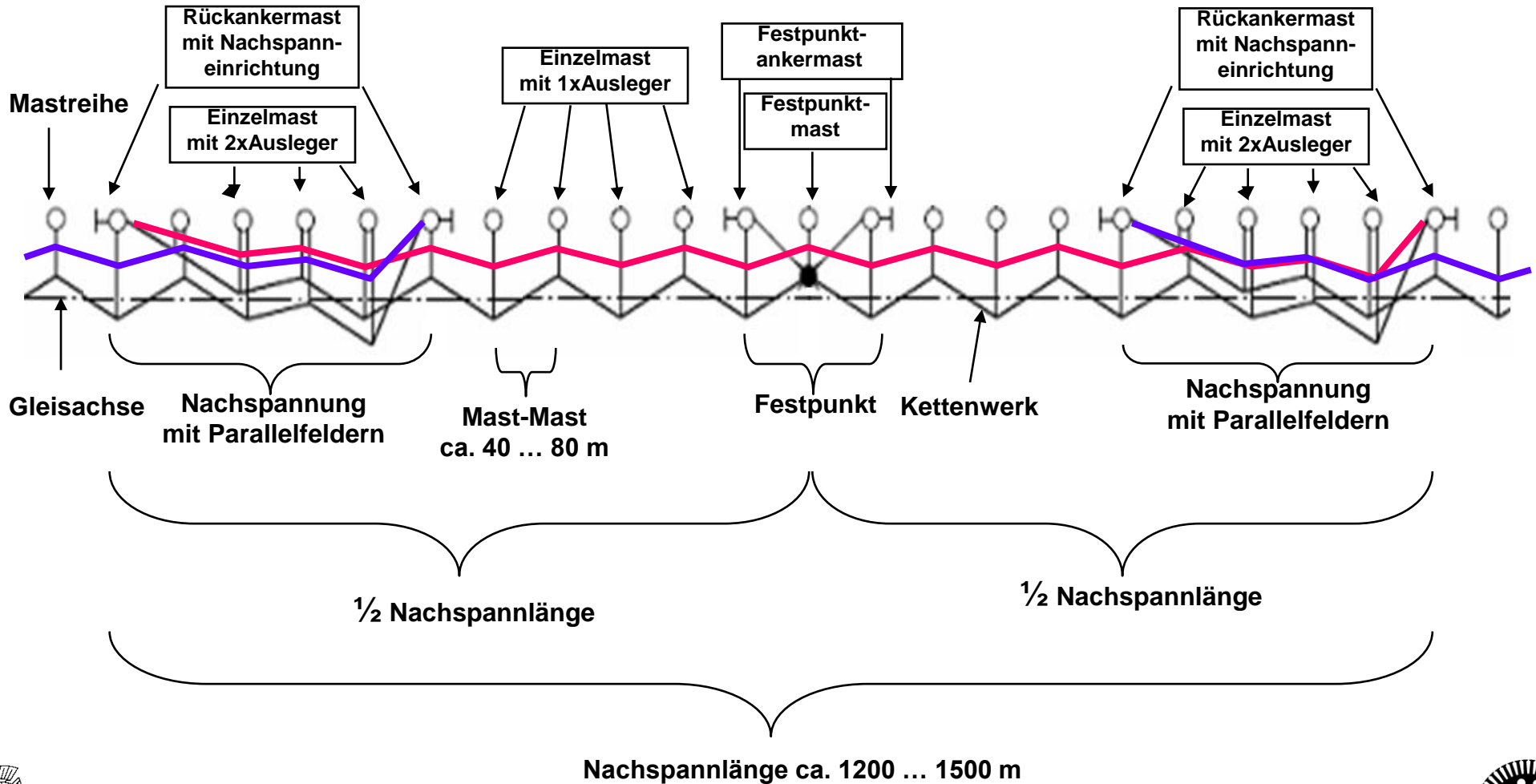
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Einfachkettenfahrleitung der DB AG [96]



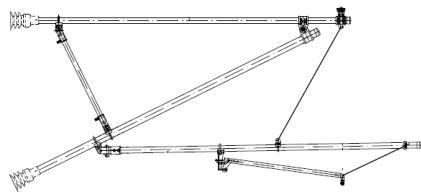
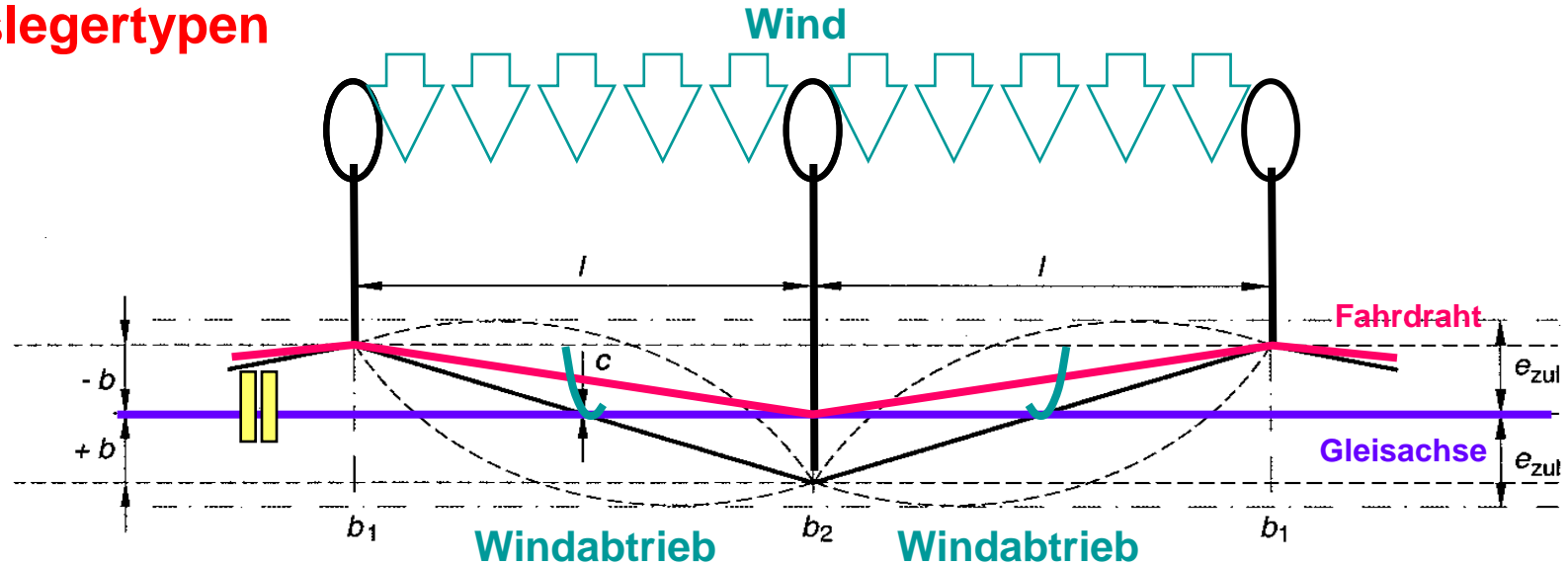
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Aufbau einer Nachspannlänge [96]

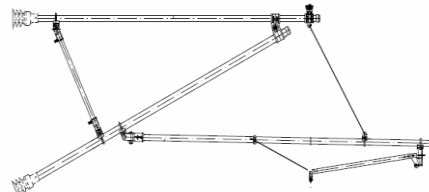


8 Bahnenergieversorgungssysteme

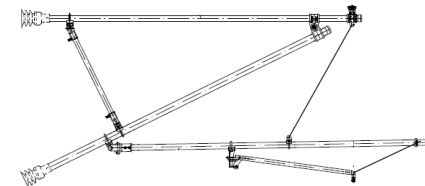
Fahrdrahtseitenlage (FD-Zick-Zack) [97] Auslegertypen



angelenkt



umgelenkt



angelenkt

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Nachspanneinrichtung - Längendehnung durch Erwärmung [96]

Wärmedehnung der Drähten und Seile:

- Oberleitungen in Mitteleuropa sollen arbeiten im Bereich von ca. -20°C ... 80°C

(80°C – heißt 40°C Umgebungstemperatur + 40 K Erwärmung durch Stromfluss)

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

ΔL = Längenzunahme

L = Ursprungslänge = $\frac{1}{2}$ Nachspannlänge

α = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient

$17,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für Cu - Fahrdraht

$17,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für Bz II - Seile

$23,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für Al - Seile

$11,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für St-Seile

ϑ_2 = betrachtete Temperatur (max. Temperatur 80°C)

ϑ_1 = Ursprungstemperatur (min. Temperatur -20°C)

Beispiel: Halbe Nachspannlänge $L = 750 \text{ m}$:

Temperaturzunahme 100 K

Längenzunahme: Tragseil (Bronze): $1,275 \text{ m}$

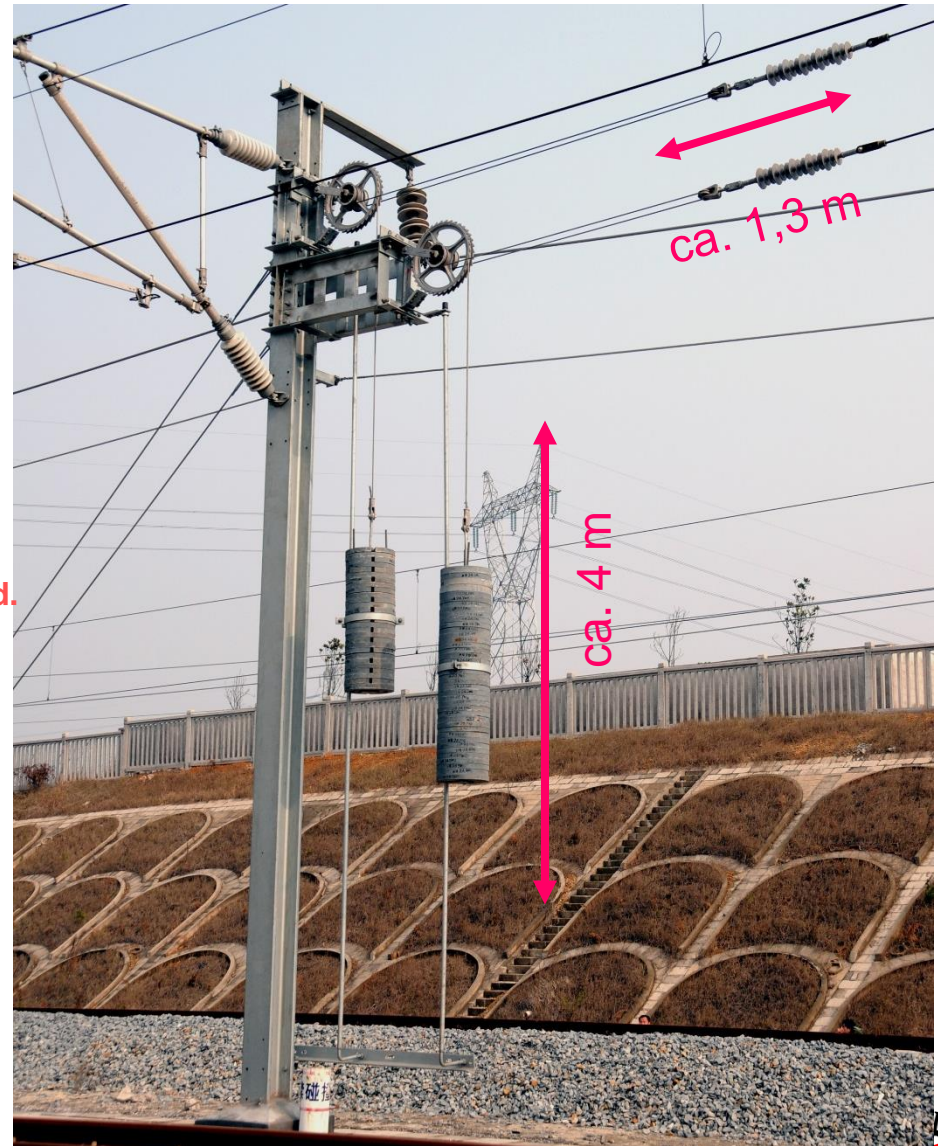
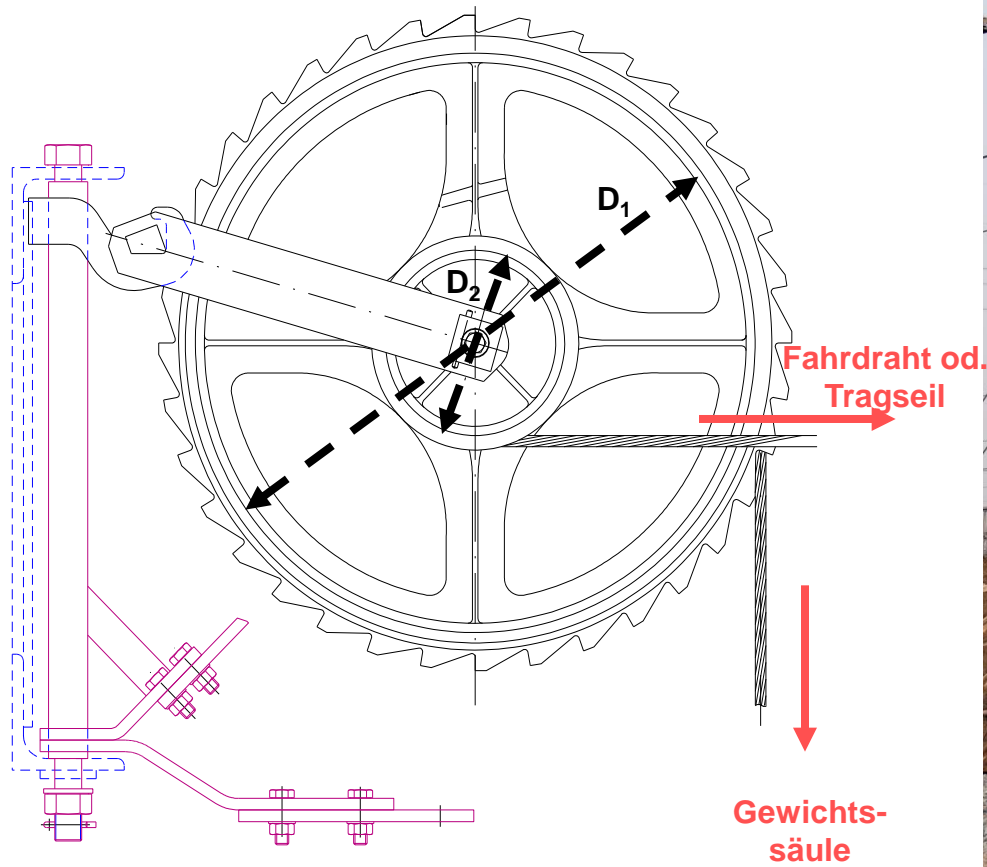
Fahrdraht (Kupfer): $1,298 \text{ m}$



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Nachspanneinrichtung (Radspanner) [96]

Verhältnis: $3:1 = D_1:D_2$



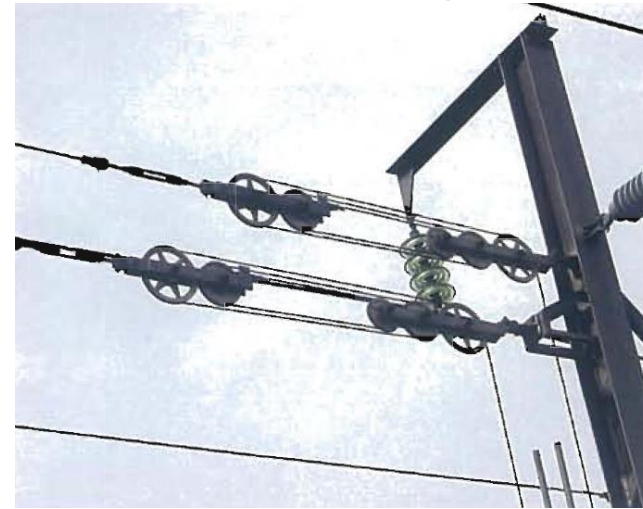
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Nachspanneinrichtung [96]

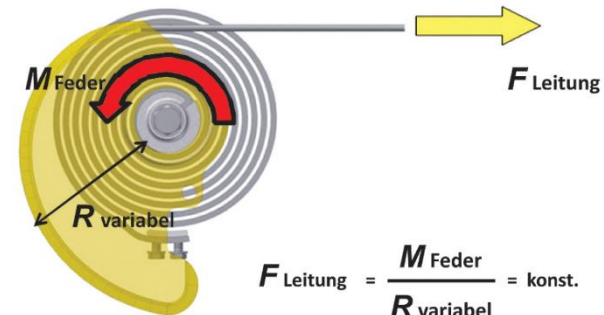
Nachspanneinrichtung
in Tunnel



Nachspanneinrichtung mit
Flaschenzug



Nachspanneinrichtung mit Feder (Tensorix C+ - Pfisterer)



Einzelmastbauweise

Einzelmastbauweise
freie Strecke und Bahnhofsgleise für hohe Geschwindigkeiten



Strecke Madrid-Lerida EAC 350 [97]

- Mechanische Trennung beider Gleise
- Keine Interaktion der Kettenwerke
- Störungen betreffen i.d.R. nur ein Gleis
- Voraussetzung – genügend Platz neben und zwischen den Gleisen

Jochbauweise

Jochbauweise Bahnhofsgleise für hohe Geschwindigkeiten



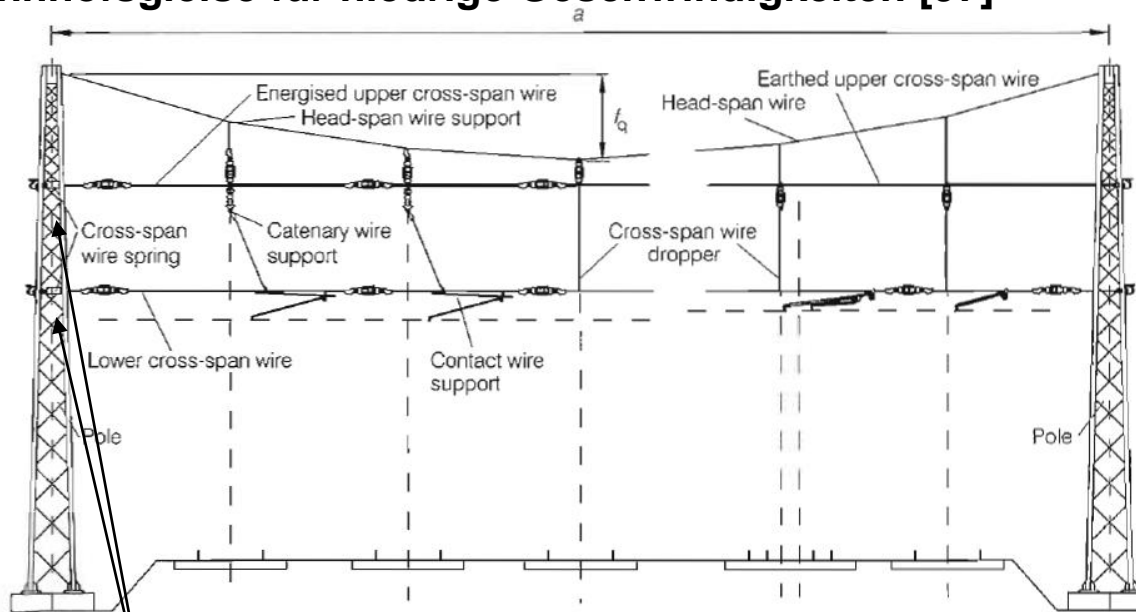
Strecke Zhengzhou-Xian (China) [97]

- Weitestgehende mechanische Trennung der Kettenwerke der Gleise
- Keine Interaktion der Kettenwerke
- Überspannung von 3...6 Gleisen möglich
- Störungen betreffen i.d.R. nur ein Gleis
- Anwendung im Bahnhofsbereich insbesondere in Bahnhofsbereichen High Speed

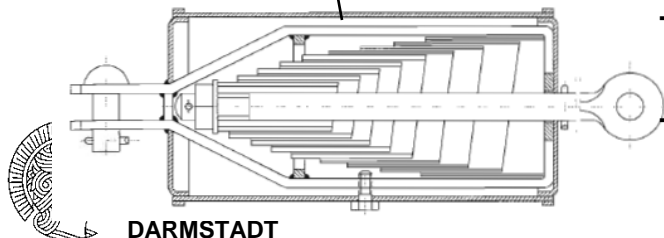
Querfeldbauweise

Querfeldbauweise

Bahnofsgleise für niedrige Geschwindigkeiten [97]

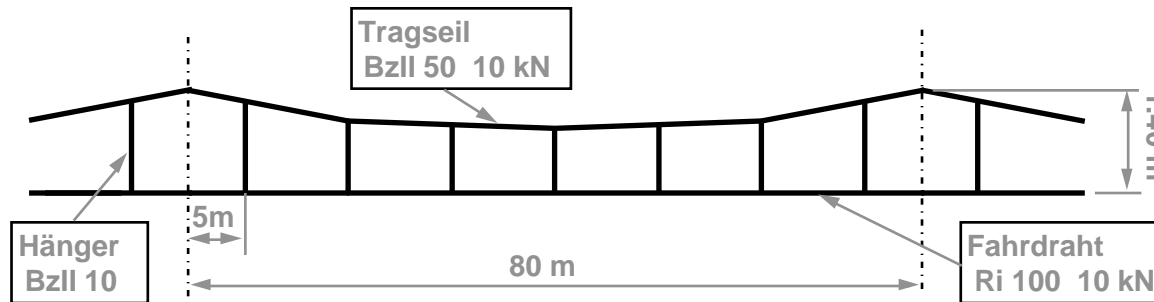


- Keine mechanische Trennung der Kettenwerke der Gleise
- Interaktion der Kettenwerke
- Überspannung von 3...10 Gleisen möglich
- Störungen können alle Kettenwerke betreffen Anwendung im Bahnhofsbereich
- Anwendung insb. in großen Bahnhöfen (niedrige Geschwindigkeit)



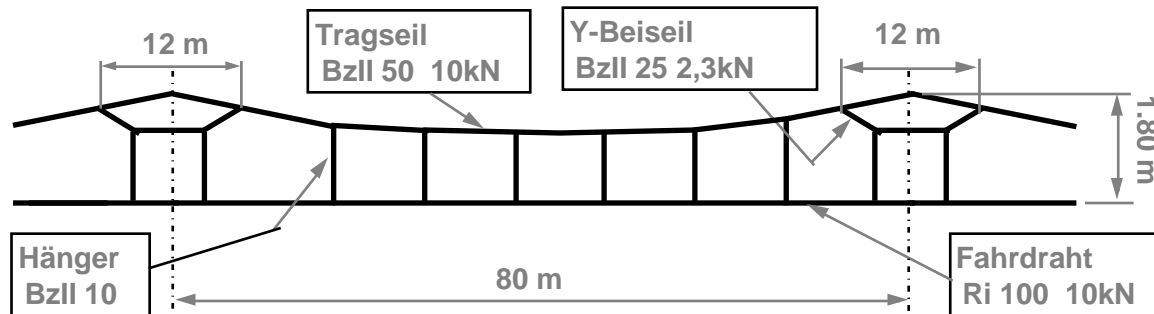
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Kettenwerke, DB Standard [96]



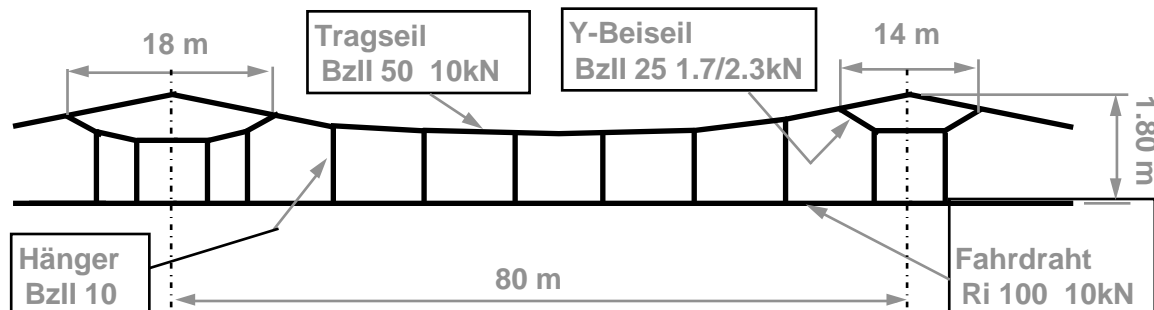
Re 100

Für Nebengleise,
früher wurde auch Re75
verwendet



Re 160

Für Hauptgleise,
am meisten verbreitet



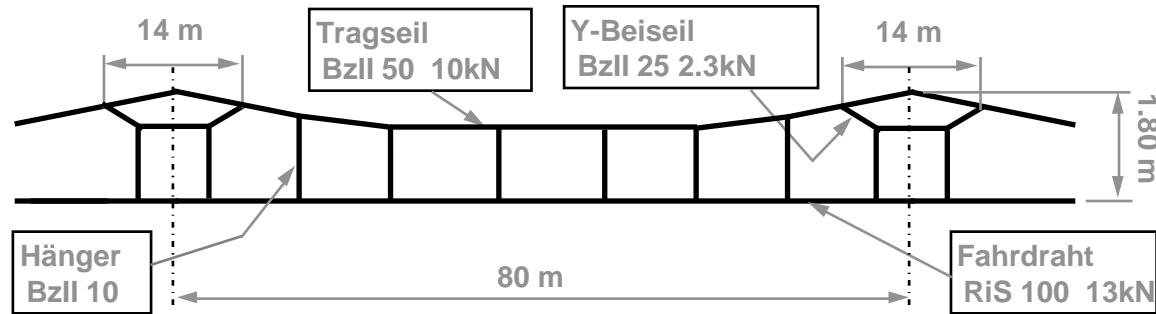
Re 200

Für Hauptgleise,
heute Standardoberleitung
bis $r \Rightarrow 1200m$,
darunter Re160



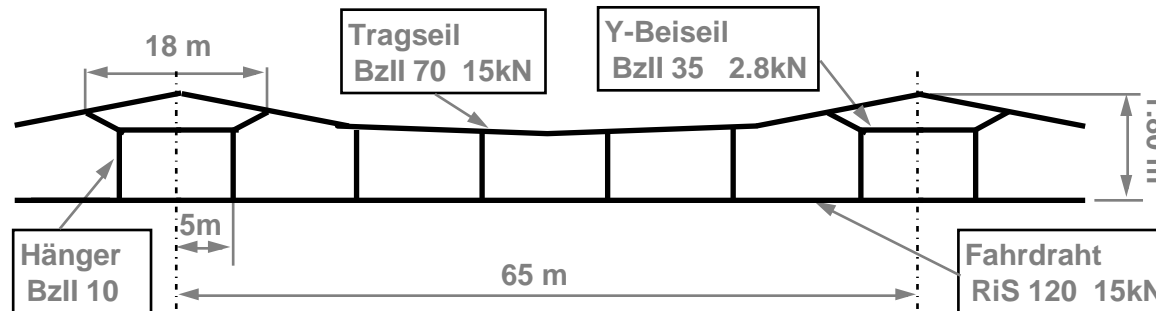
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Kettenwerke, DB HGS [96]



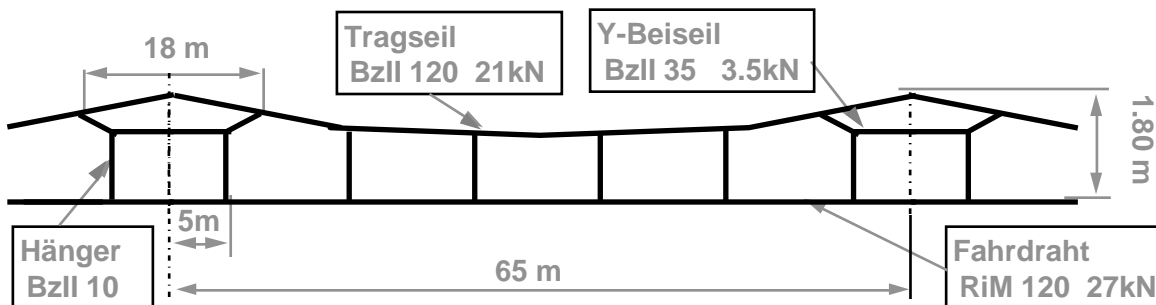
Re 200 mod

Entstand aus Re 200 für Fahrgeschwindigkeiten bis 230km/h



Re 250

Vollständige Neuentwicklung. Erstmals Einsatz von Aluminiumbauteilen. Wird bis 280km/h befahren.



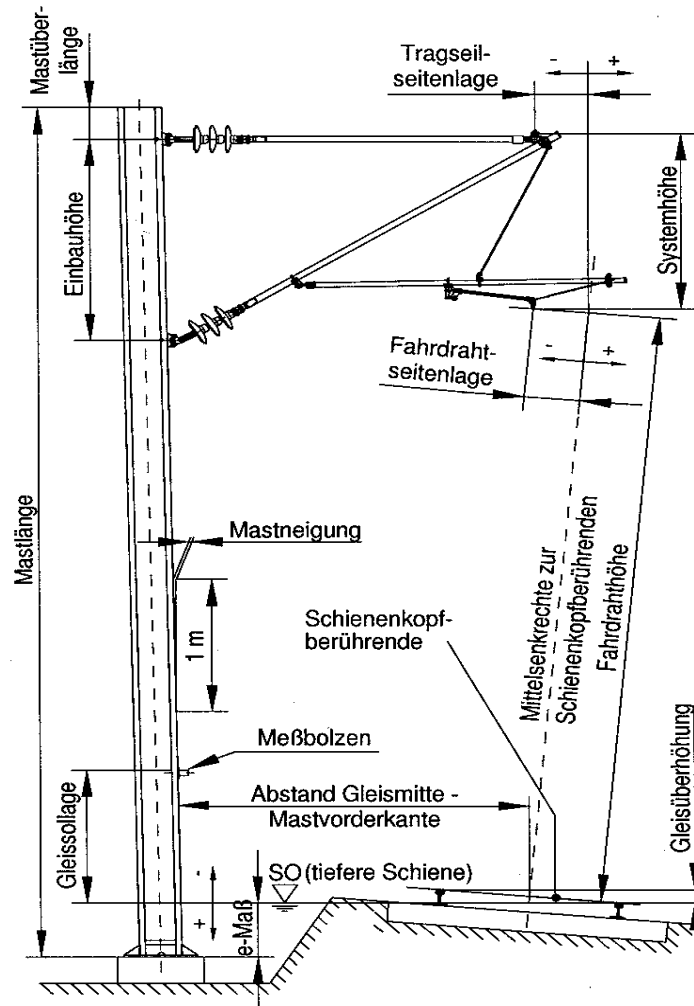
Re 330

Weiterentwicklung der Re 250. Kann mit einem Stromabnehmer über 350km/h befahren werden.



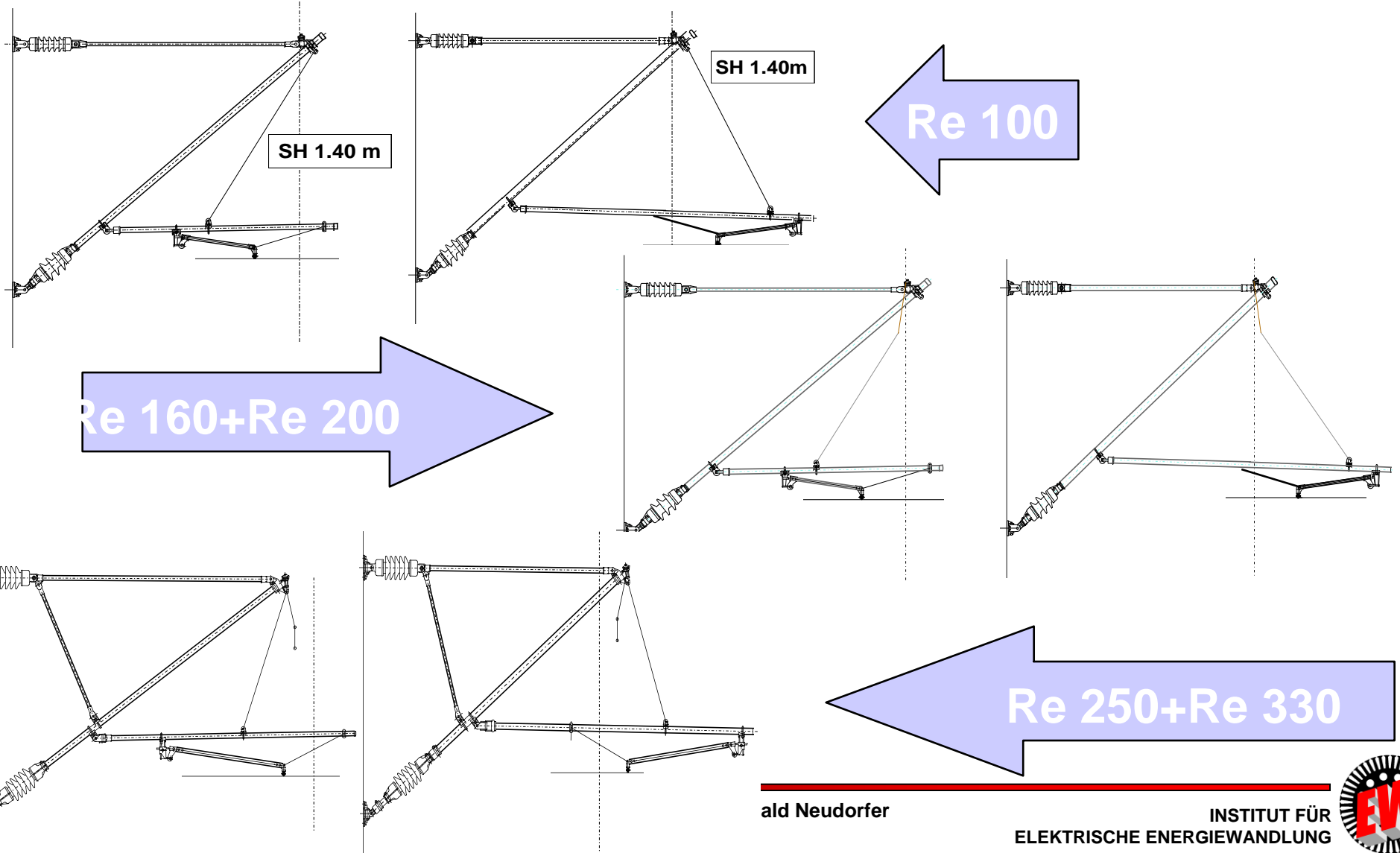
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Stützpunkte, Ausleger [96]



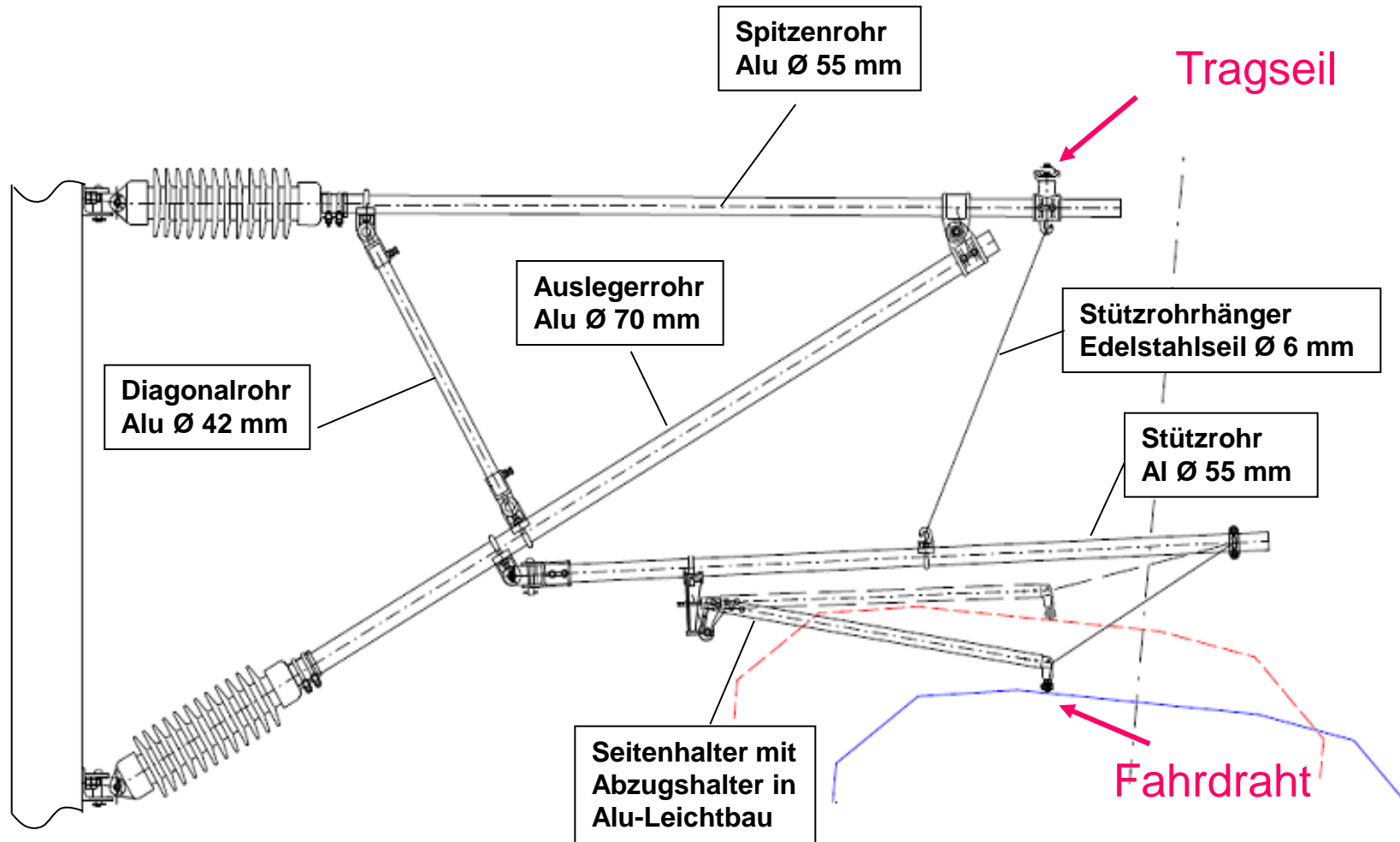
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Stützpunkte, Ausleger [96]



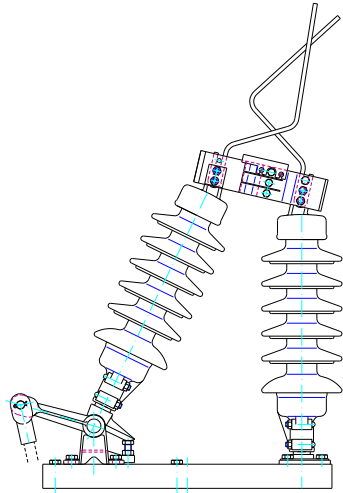
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Stützpunkte, Ausleger [96]

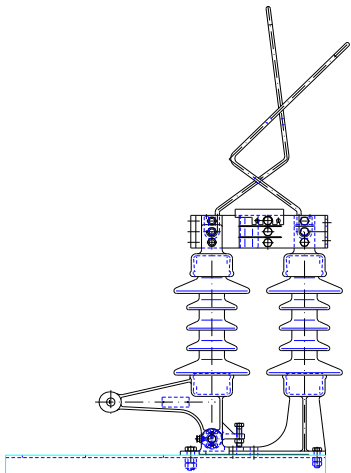
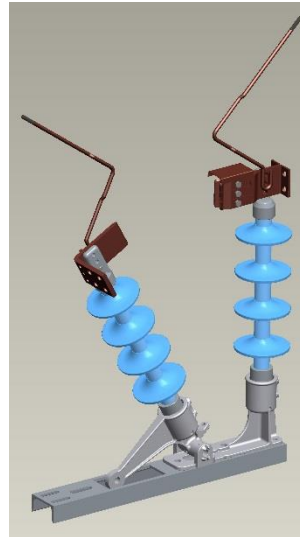


8 Bahnenergieversorgungssysteme

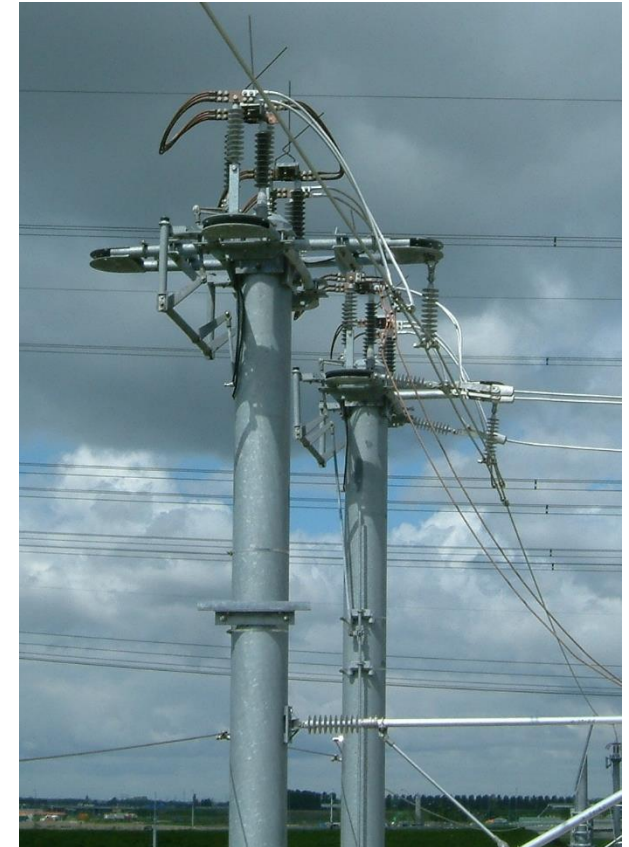
Masttrennschalter [97]



25 kV-Schalter
Export, Eisen

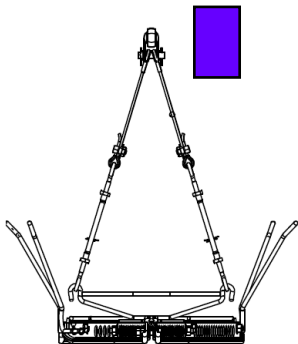
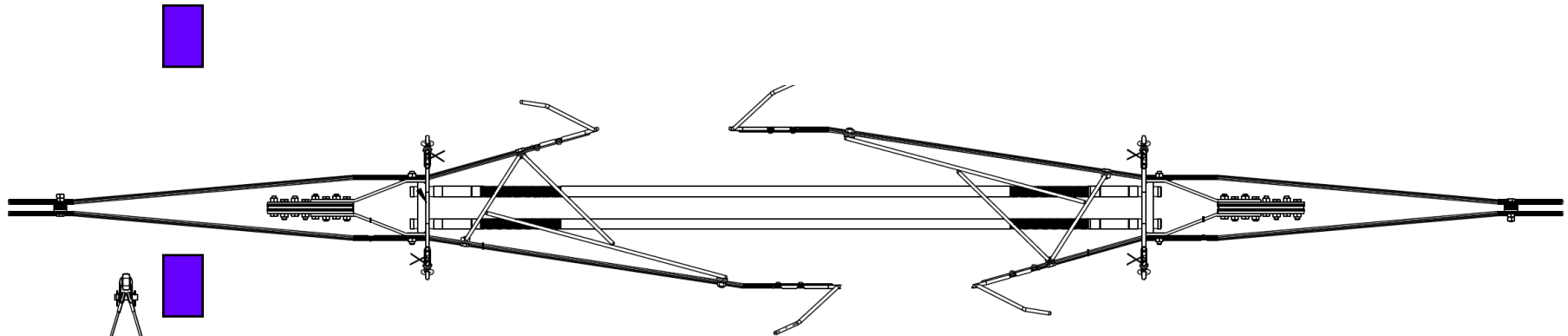
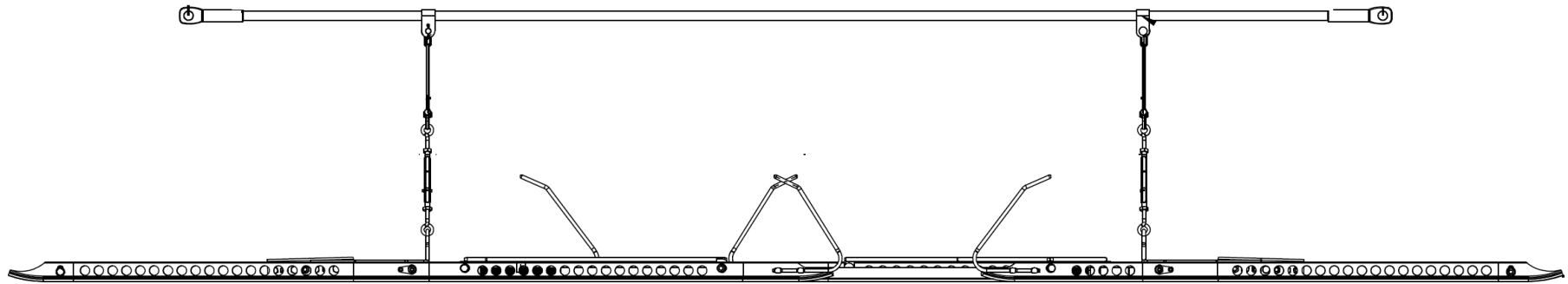


15 kV-Schalter
DB, Eisen



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Streckentrenner (200km/h) [97]

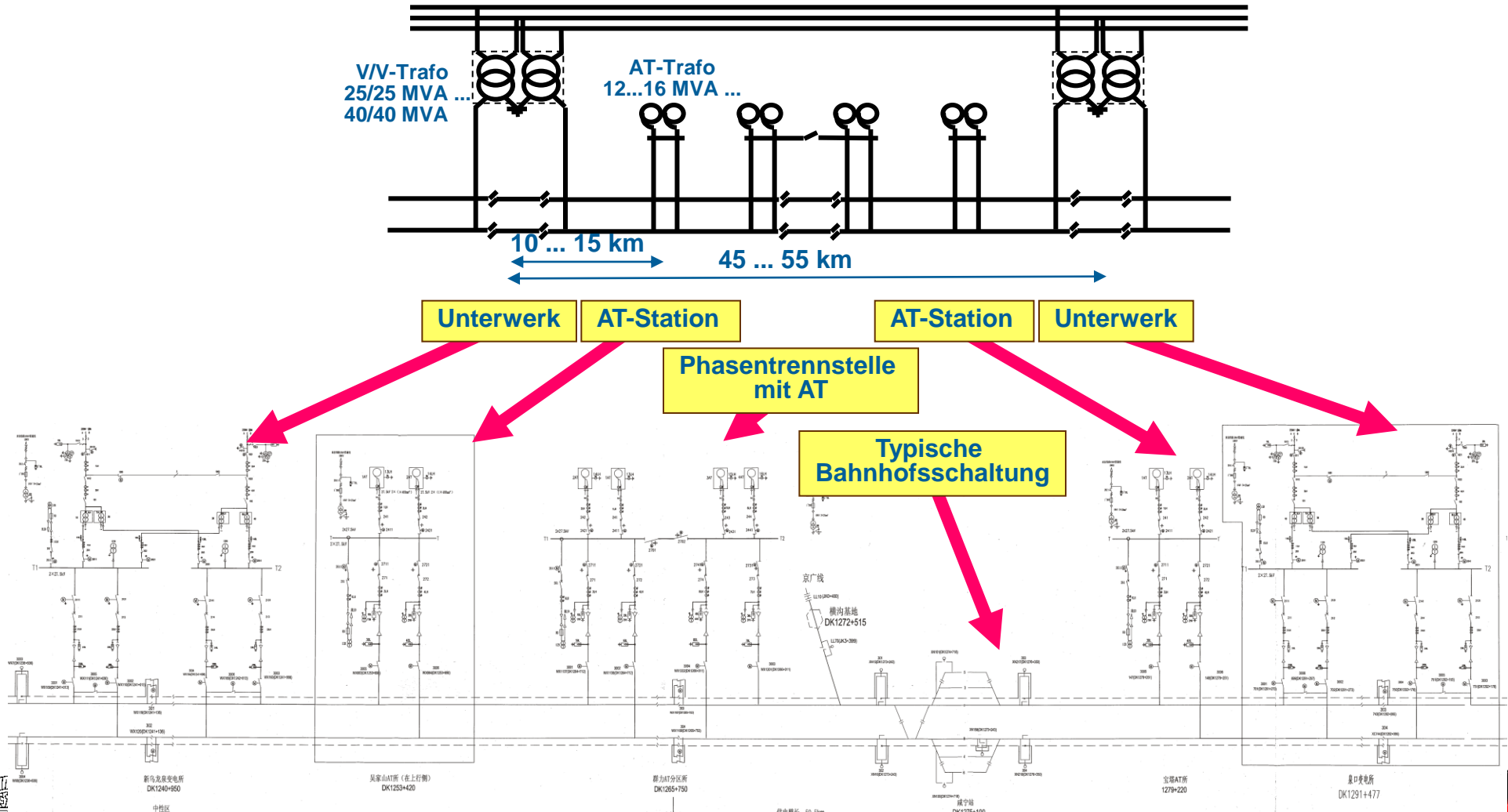


**Keine Stromunterbrechung während der Befahrung;
Beide Seiten des Kettenwerkes werden kurzzeitig überbrückt**



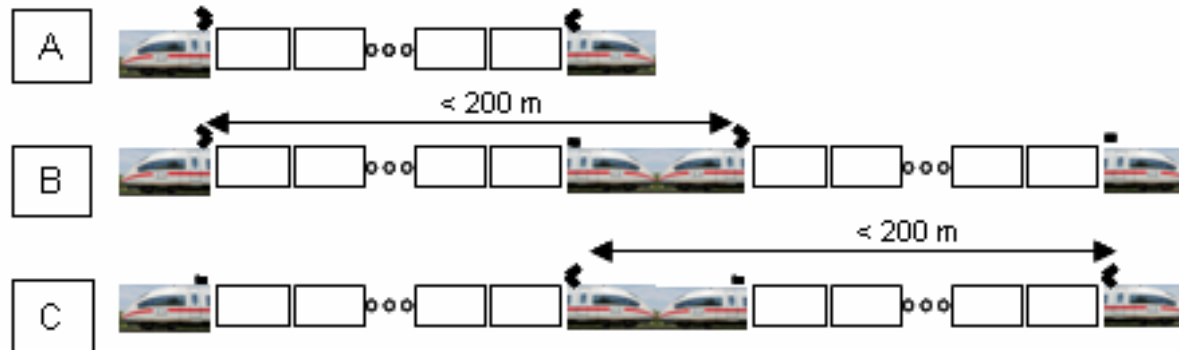
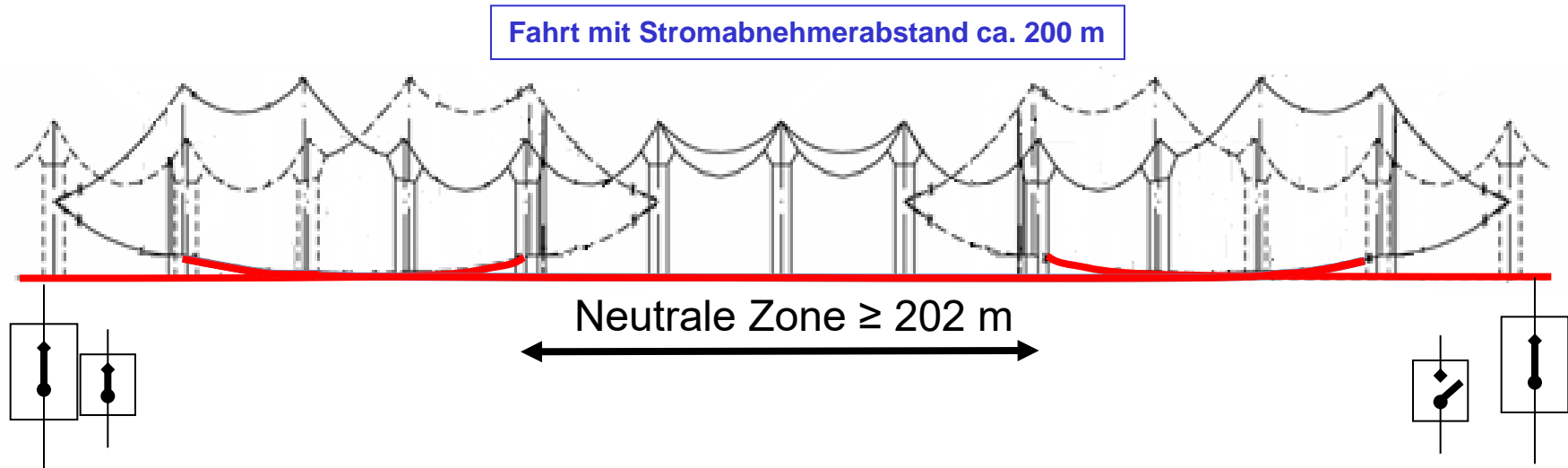
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Bahnergieversorgungssystem – 2x25-kV, Speiseschema WG [97]



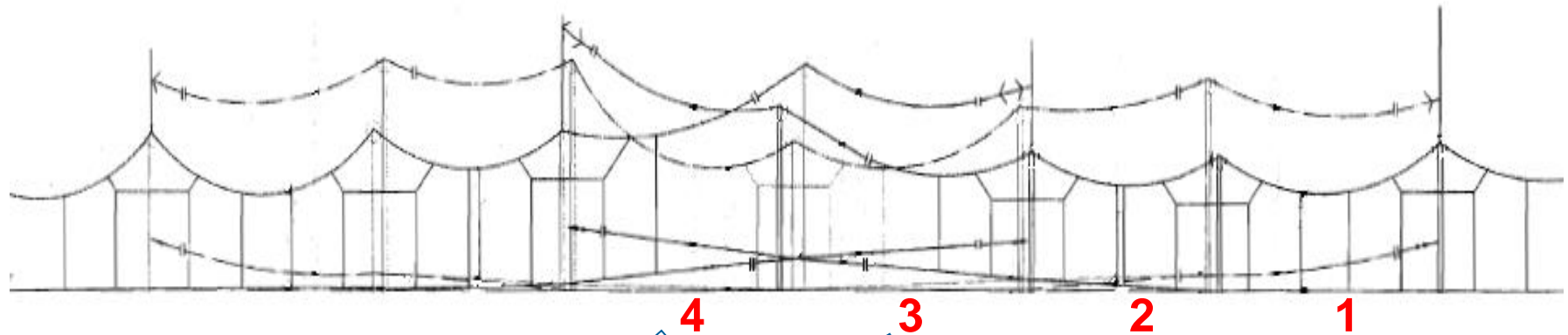
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Phasentrennstelle für High-Speed-Line ausgeführt mit 2 x 5-feldrigen Nachspannungen [97]



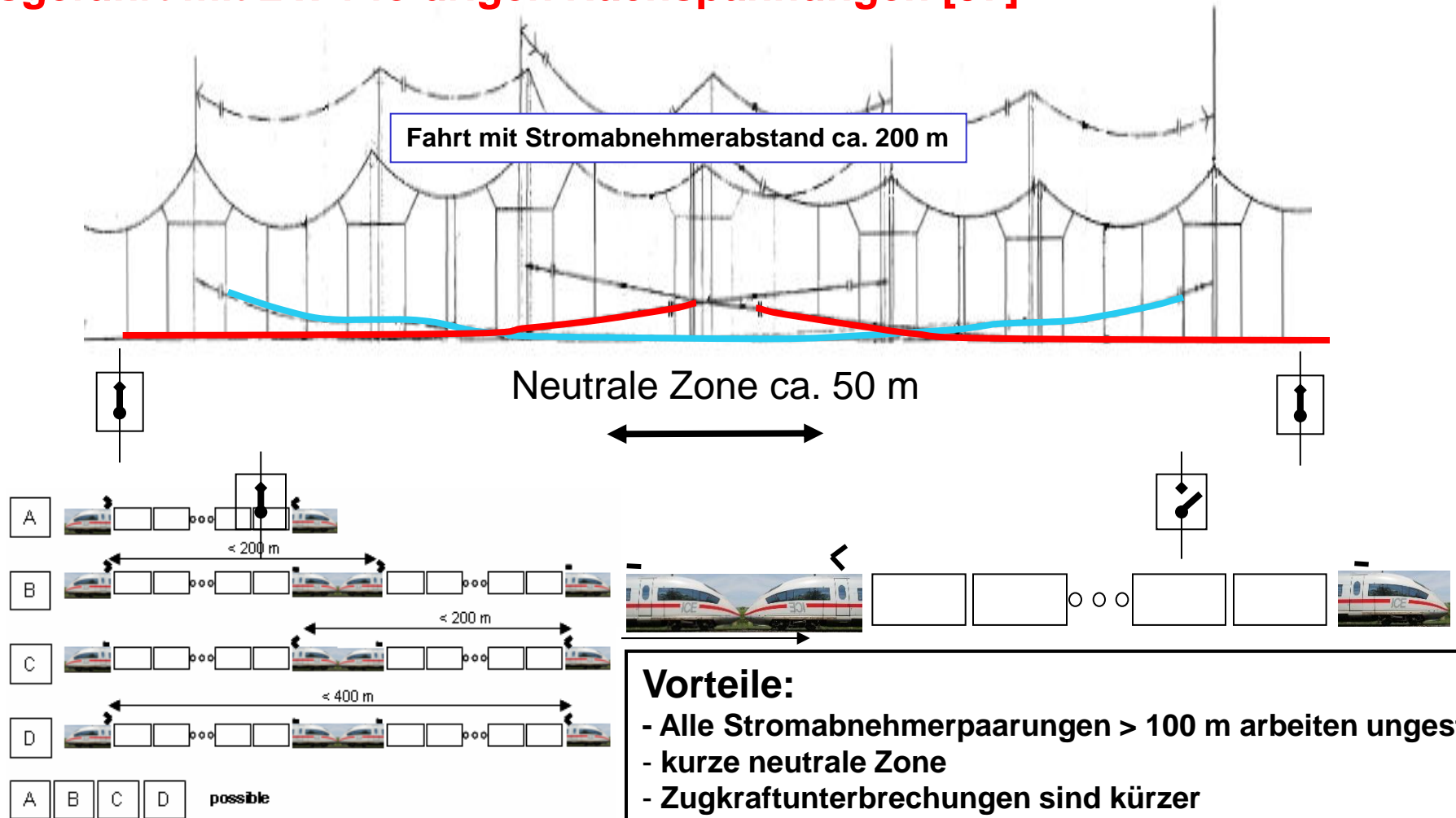
8 Bahnenergieversorgungssysteme

**Phasentrennstelle für High-Speed-Line
ausgeführt mit 2 x 4-feldrigen Nachspannungen
Chinesische Entwicklung (genannt 6-feldrige phase-break) [97]**



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Phasentrennstelle für High-Speed-Line ausgeführt mit 2 x 4-feldrigen Nachspannungen [97]



Vorteile:

- Alle Stromabnehmerpaarungen > 100 m arbeiten ungestört
- kurze neutrale Zone
- Zugkraftunterbrechungen sind kürzer
- Einspeiseanschlüsse signifikant kürzer



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit [96]

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit der Fortbewegung eines Kraftimpulses entlang der Oberleitung (Fahrdraht).

Die Betriebsgeschwindigkeit von Oberleitungen soll ca. 70 % der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit nicht überschreiten.

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = 3,6 * \sqrt{\frac{H_F}{m_F}} \quad \begin{array}{l} H_F - \text{Horizontalzugkraft in N} \\ m_F - \text{Gewicht in kg/m} \end{array} \quad v_{\max} \leq 0,7 * c$$

Die Betriebsgeschwindigkeit sollte auf keinen Fall 70% der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit übersteigen. Die max. Betriebsgeschwindigkeit ist jedoch nicht nur von der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit abhängig.

Re 250 CuAg 120 15 kN c = 427 km/h v_{max} = 299 km/h

RbJ330 CuMg 120 27 kN c = 572 km/h v_{max} = 400 km/h

EAC-350 CuMg 150 31,5 kN c = 553 km/h v_{max} = 387 km/h

ZX CuMg 150 28,5 kN c = 525 km/h v_{max} = 368 km/h

WG CuMg 150 30,0 kN c = 540 km/h v_{max} = 378 km/h



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Elastizität

→ Die Elastizität (Nachgiebigkeit) der Oberleitung ist der Anhub des Fahrdrabtes bei Anlegen einer definierten Kraft (Stromabnehmer) in mm/N.

Für die europäischen Hochgeschwindigkeitsstrecken ist ein zulässiger Anhub in Feldmitte (zwischen 2 Stützpunkten) von 0,5 mm/N einzuhalten.



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Ungleichförmigkeit

→ Die Ungleichförmigkeit ist ein Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Elastizität der Oberleitung innerhalb eines Feldes (zwischen zwei Stützpunkten).

Hochgeschwindigkeitsoberleitungen müssen möglichst niedrige Ungleichförmigkeiten besitzen.

System	V_{\max} km/h	Kontaktkraft		Ungleichförmigkeit %
		max N	min	
AC	≤ 200	250	> 0	30
AC	> 200	300	> 0	20
DC	< 160			70
DC	≤ 200	300	> 0	60
DC	> 200	400	> 0	60

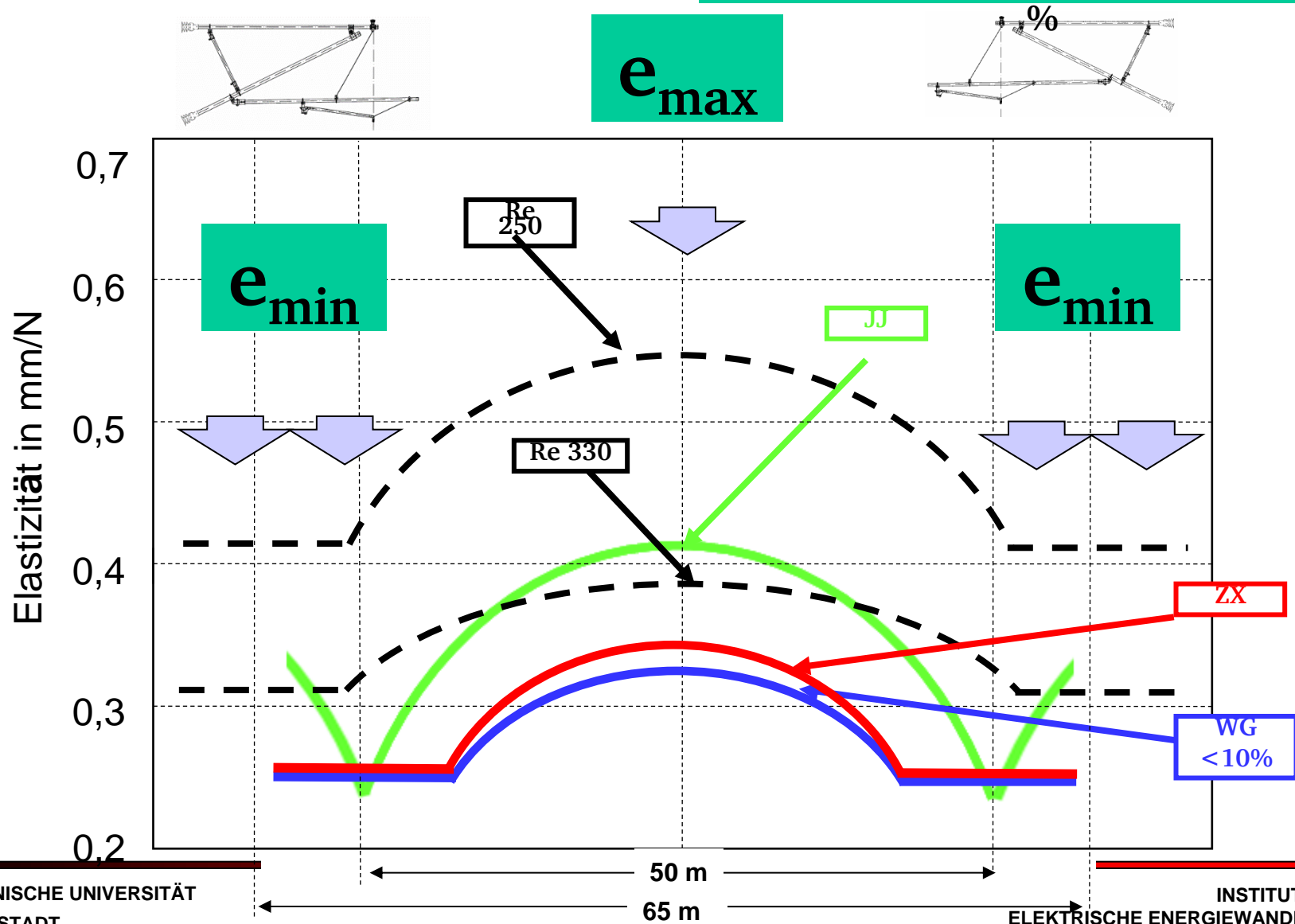
Art der Oberleitung	Fahrgeschwindigkeit in km/h		
	200 ... 230	230 ... 300	> 300
ohne Y-Beseil	< 40	< 40	< 25
mit Y-Beseil	< 20	< 10	< 10



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Ungleichförmigkeit [96]

$$u = ((e_{\max} - e_{\min}) / (e_{\max} + e_{\min})) * 100$$



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Vertikale Bewegung des Kontaktpunktes

➔ Eine in der Praxis direkt messbare Größe des gleichmäßigen Laufes des Stromabnehmers an der Oberleitung ist die vertikale Bewegung des Kontaktpunktes.

Die neue TSI (Ausgabe 2008) legt dafür einen Grenzwert von < 80 mm fest. Festlegungen zu Elastizität und Ungleichförmigkeit werden in der TSI nicht mehr getroffen.

Der Kontaktpunkt ist der Punkt des mechanischen Kontakts zwischen Schleifstück und Fahrdraht.

Die vertikale Höhe des Kontaktpunktes über dem Gleis muss über ein Längsspannfeld möglichst einheitlich sein; dies ist für eine gute Stromabnahmequalität ausschlaggebend.

Der größte Unterschied zwischen dem höchsten und niedrigsten dynamischen Kontaktpunkt innerhalb eines Längsspannfeldes muss < 80 mm sein.



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Kontaktkraft Fahrdraht-Stromabnehmer

➔ Kontaktkraft ist die Anpresskraft zwischen Kohleschleifleisten eines Stromabnehmers an den Fahrdraht.

Sie ist die unter realen Bedingungen die auftretende dynamische Kraft zwischen Schleifleisten und Fahrdraht.

Die Höhe der Kontaktkraft und ihre Schwankungsbreite ist ein Bewertungsmaßstab für

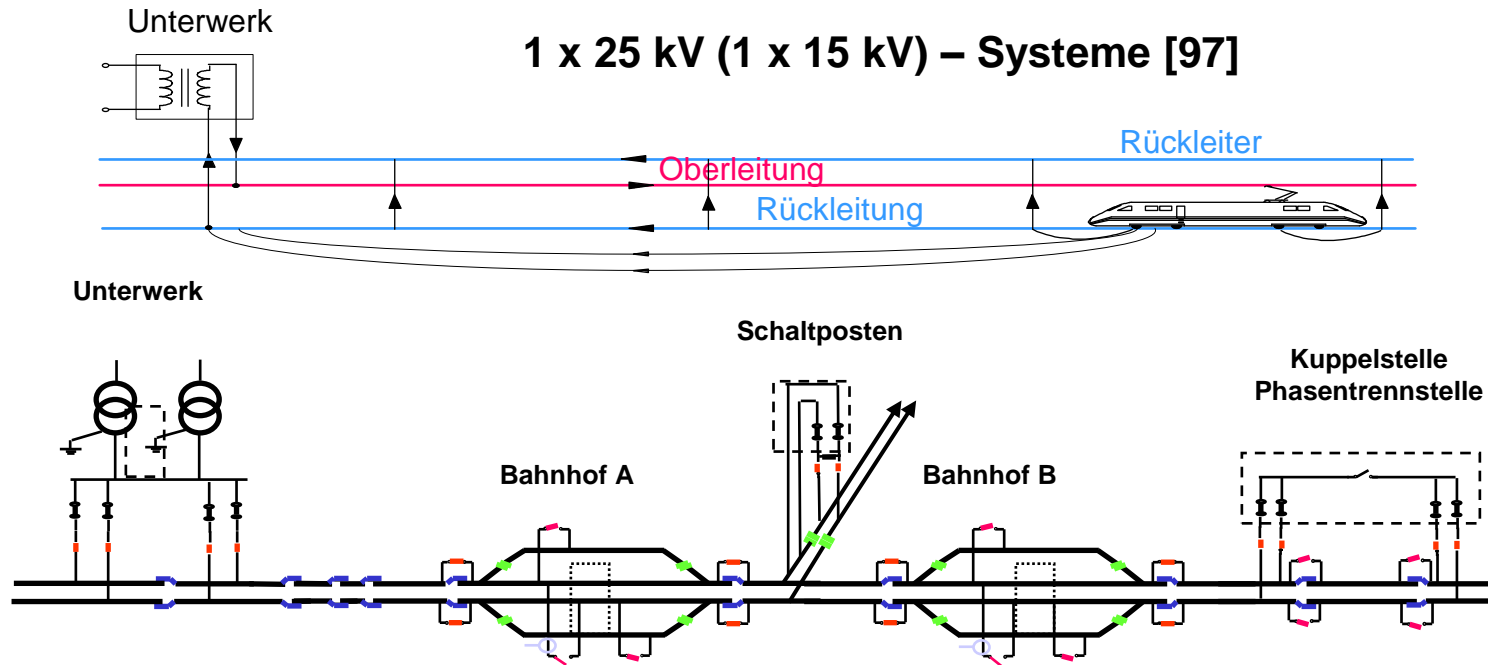
- das Laufverhalten der Oberleitung (Dynamik)
- den Verschleiß des Fahrdrahtes und der Schleifleisten
- die Qualität der Stromabnahme



8 Bahnenergieversorgungssysteme

8.3. Schaltanlagen (Unterwerke/ Kuppelstellen) in AC-Bahnenergieversorgungssystemen

Begriffe



Bahnhofs(Strecken-)schaltungen

Schaltanlagen (Mastschalter) im Bereich der Oberleitung, insbesondere in Bahnhöfen

Unterwerke

Schaltanlage zur Leistungseinspeisung in die Oberleitung

Kuppelstelle

Schaltanlage zur Längs- und Querkupplung der Oberleitung zwischen Unterwerken

Schaltposten

Schaltanlage zur Versorgung abgehender Strecken aus der Oberleitung

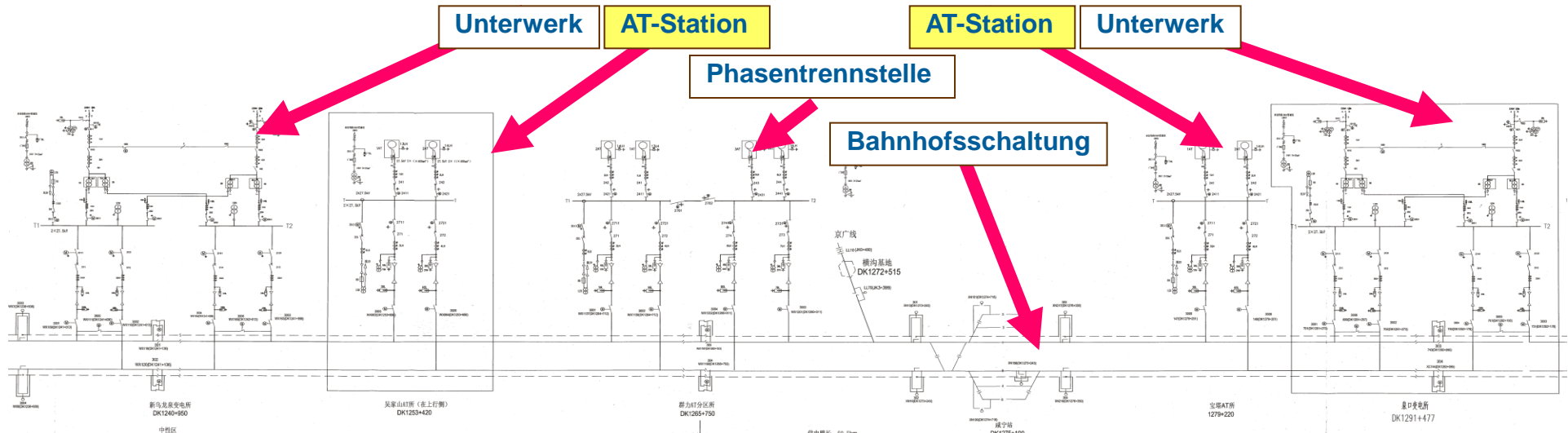
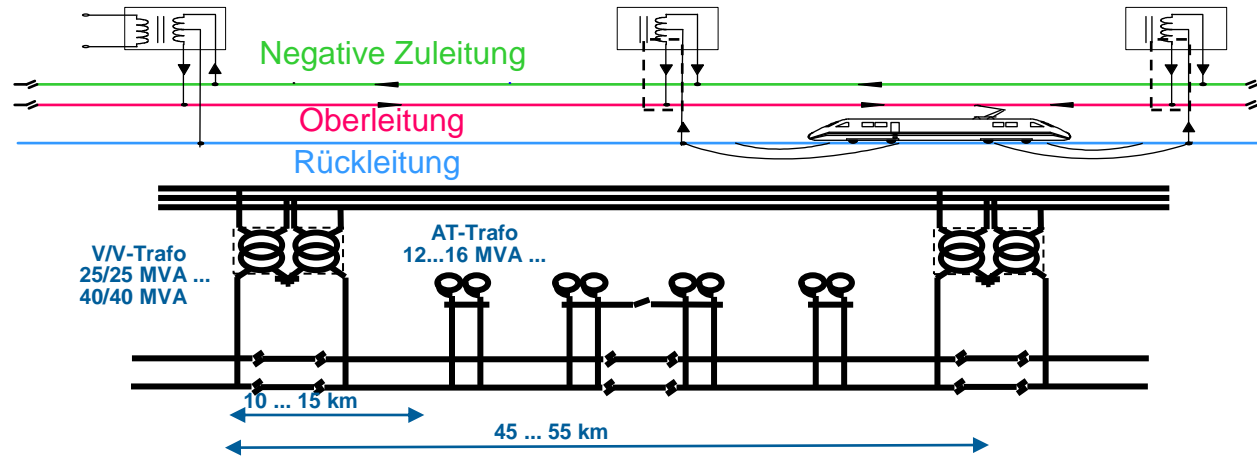


8 Bahnenergieversorgungssysteme

Begriffe

2 x 25 kV –
Systeme [97]

AT-Station:
Autotransformator
= Spartransformator

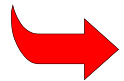


Zusätzlich bei 2x25 kV - AT-Stationen

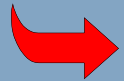
Schaltanlage zur Verbindung der Autotransformatoren mit der Oberleitung



Schaltanlagen (Unterwerke / Kuppelstellen) in AC-Systemen



1. Begriffe



2. Oberleitungsschaltungen

- Spannungsfall abhängig von Streckenschaltung
- typische Bahnhofsschaltungen



3. Unterwerke / Kuppelstellen (Primärtechnik)

- Grundsätzlicher Aufbau
- 1x25-kV-Single Line
- 2x25 kV-Single Line (Unterwerk/AT-Station/Phasentrennstelle)
- Ausgewählte Geräte (Transformator/AIS/GIS)

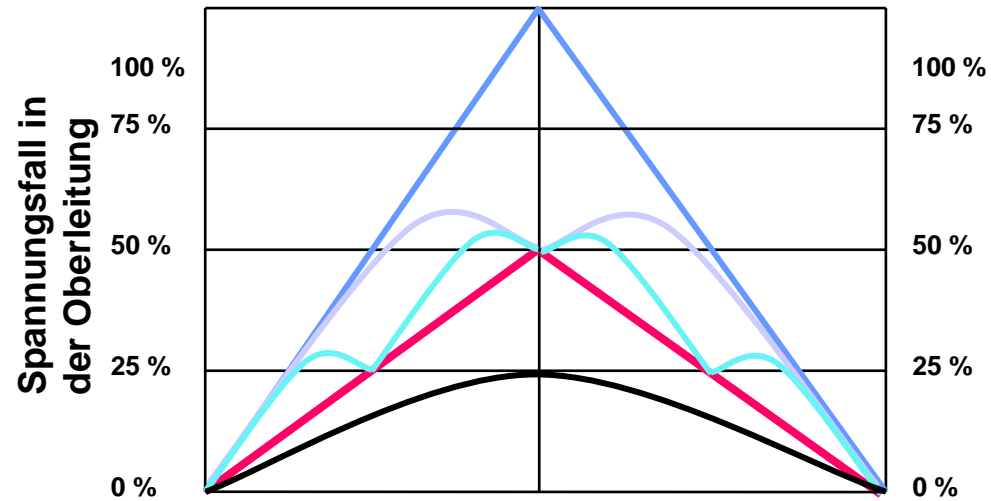


4. Sekundärtechnik



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Oberleitungsschaltung / Spannungshaltung [96]



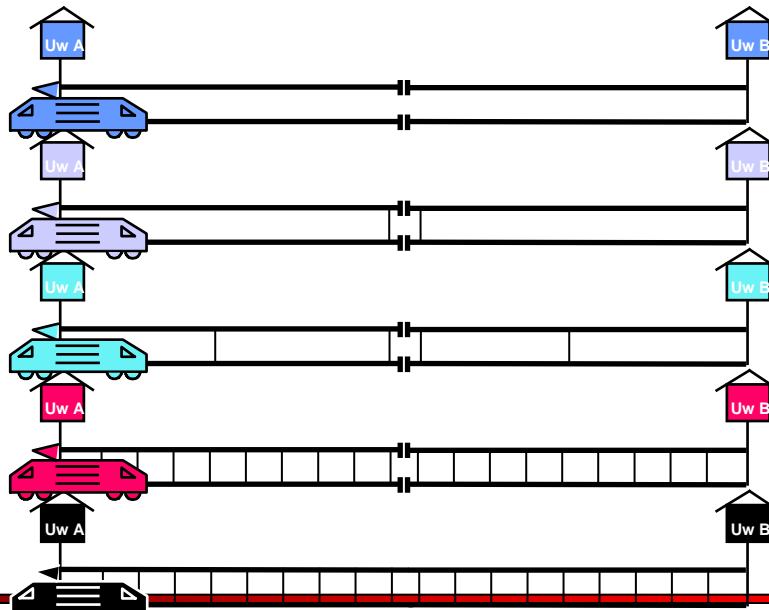
mit Phasentrennstelle
ohne Querkupplung

mit Phasentrennstelle
eine Querkupplung an Phasentrennstelle

mit Phasentrennstelle
zwei Querkupplung an Phasentrennstelle und
zwischen Unterwerk und Phasentrennstelle

mit Phasentrennstelle
Ständige Querkupplung

ohne Phasentrennstelle (Unterwerke längs
gekuppelt); Ständige Querkupplung



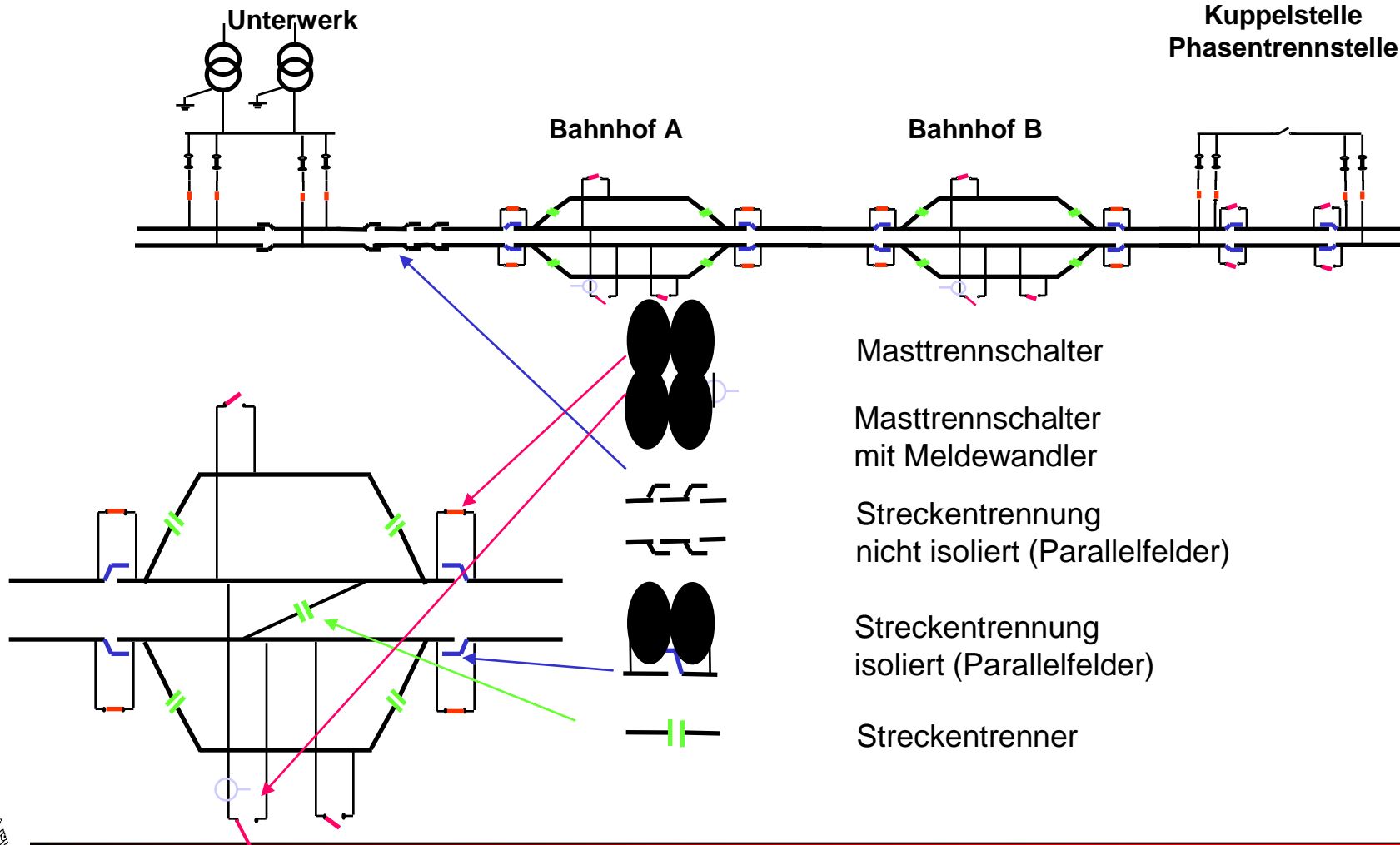
} 50 Hz-Systeme

nur bei 16,7 Hz-Systemen
möglich

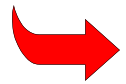


8 Bahnenergieversorgungssysteme

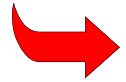
Oberleitungsschaltung/ Bahnhofsschaltung [96]



Schaltanlagen (Unterwerke / Kuppelstellen) in AC-Systemen

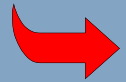


1. *Begriffe*



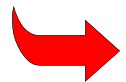
2. *Oberleitungsschaltungen*

- *Spannungsfall abhängig von Streckenschaltung*
- *typische Bahnhofsschaltungen*



3. *Unterwerke / Kuppelstellen (Primärtechnik)*

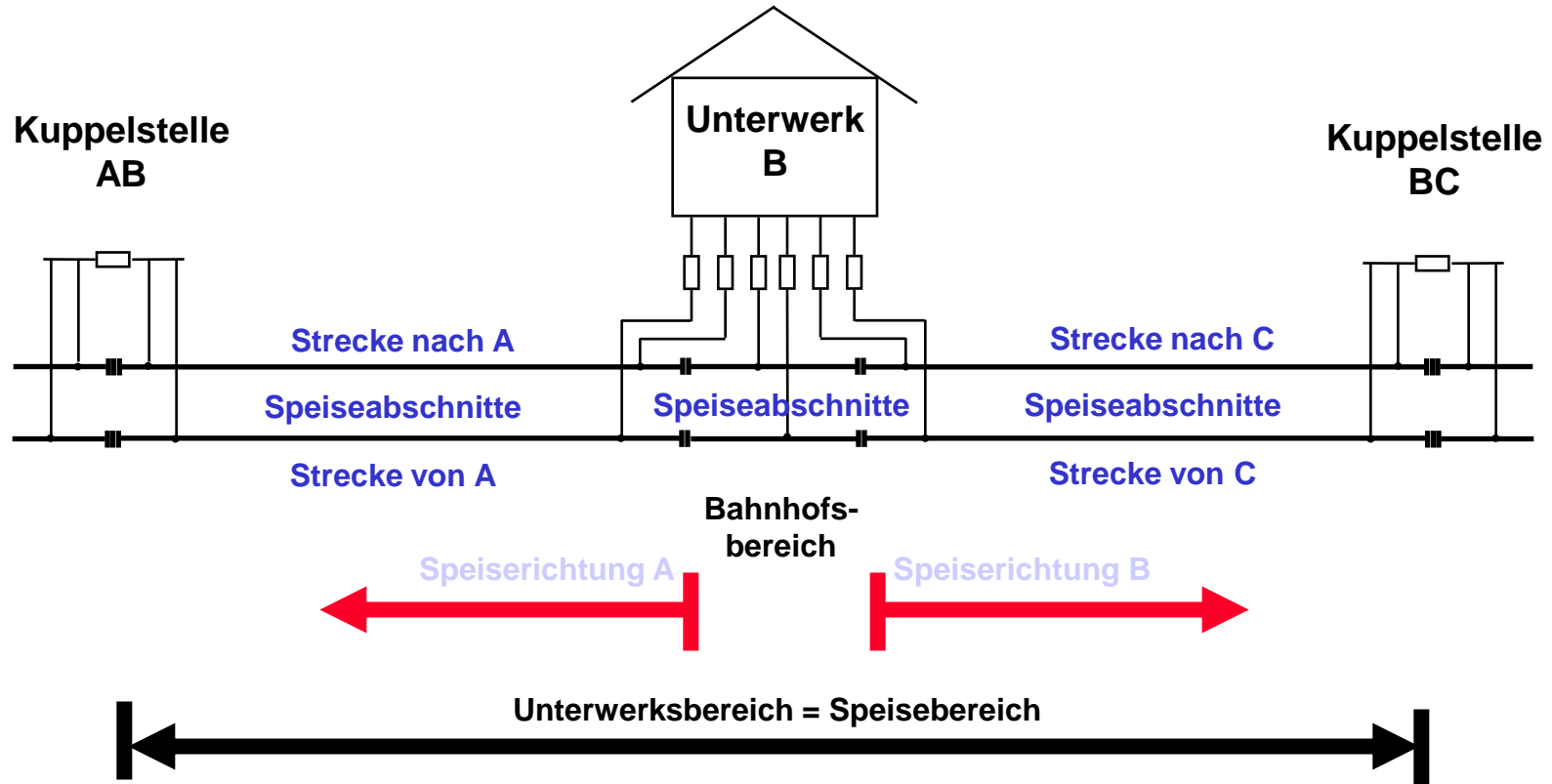
- *1x25-kV-Single Line*
- *2x25 kV-Single Line (Unterwerk/AT-Station/Phasentrennstelle)*
- *Ausgewählte Geräte (Transformator/AIS/GIS)*



4. *Sekundärtechnik*

8 Bahnenergieversorgungssysteme

Unterwerke; Speisebereiche [96]



Richtwerte für Speisebereich Unterwerk:

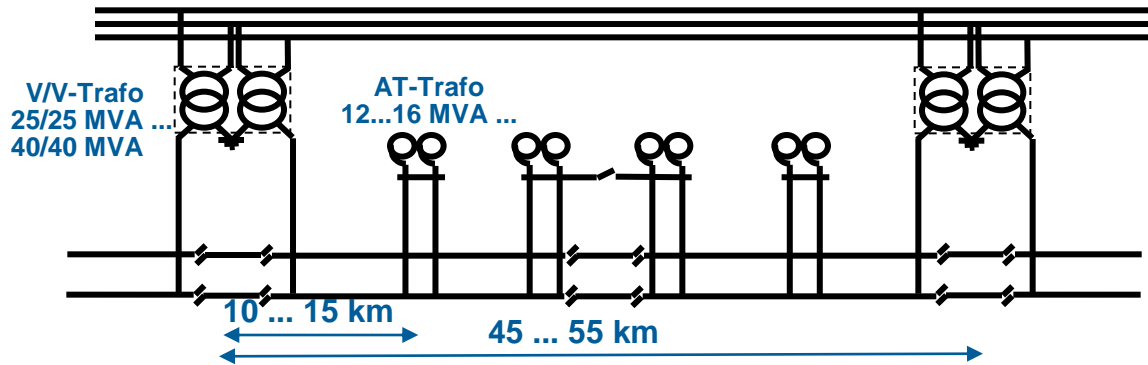
1x15 kV	ca. 30 ... 70 km	hoher Wert - Verbundbetrieb Uw
1x25 kV	ca. 30 ... 60 km	Inselbetrieb
2x25 kV	ca. 50 ... 100 km	Inselbetrieb (mit Autotransformatoren)



8 Bahnenergieversorgungssysteme

2x25 kV-Schaltanlagen [96]

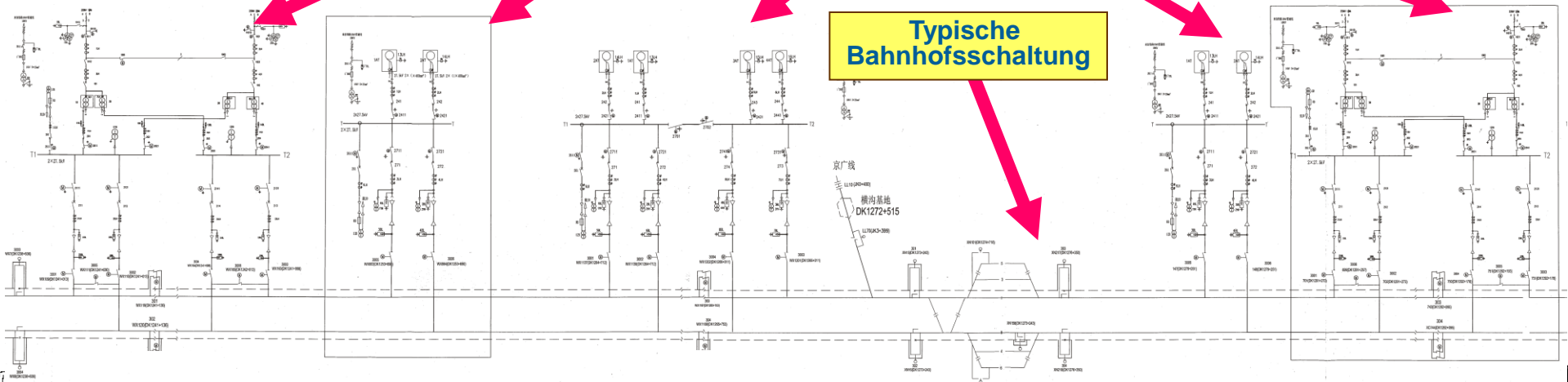
2x25 kV-Anlagen [97]



Unterwerk AT-Station AT-Station Unterwerk

Phasentrennstelle mit AT

Typische Bahnhofs-schaltung



8 Bahnenergieversorgungssysteme

25 kV-Schaltanlagen [96]

Abhängig vom Betriebskonzept werden unterschiedliche Mittelspannungsschaltanlagentypen verwendet

Freiluft-
Schaltanlage

Innenraum-
Schaltanlagen



Einspeisestation 2 x 27,5 kV
mit doppelter Sammelschiene
Einspeisestation 1 x 15 kV UK, Channel Tunnel Rail Link
Deutsche Reichsbahn 1932



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Schutzeinrichtungen im Unterwerk

Transformator- schutz

- o Überstrom
- o Differenzstrom
- o Überlast
- o Kesselschutz
- o Buchholz
- o Temperatur

Oberleitungs- schutz

- o Distanz
- o Überstrom
- o Überlast
- o Hochstrom

Übergeordneter Schutz

- o Gerüstschluß
- o Summenstrom
- o Schalter-
versager

Schutz Kompen- sationsanlage

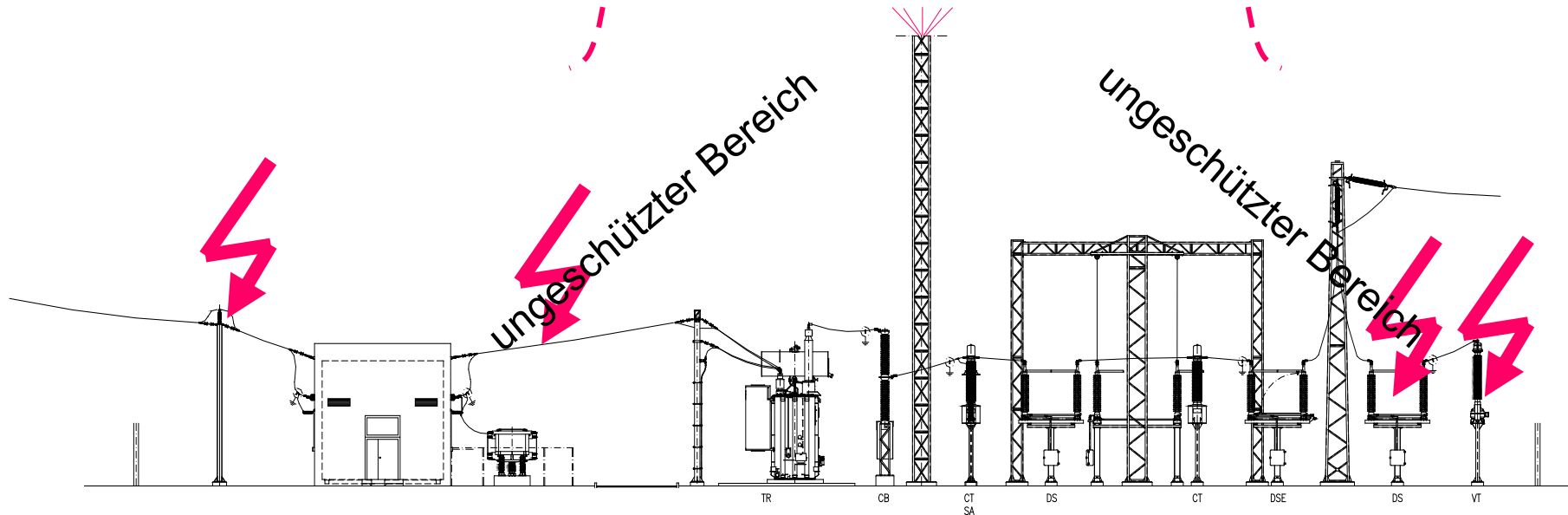
- o Überstrom
- o Unsymmetrie

Blitzschutz



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Blitzschutz im Unterwerk



Blitzschutz im Unterwerk auf der Strecke Harbin-Dalian
(Blitzschutz wurde vom chinesischen Design-Institut geplant) [97]

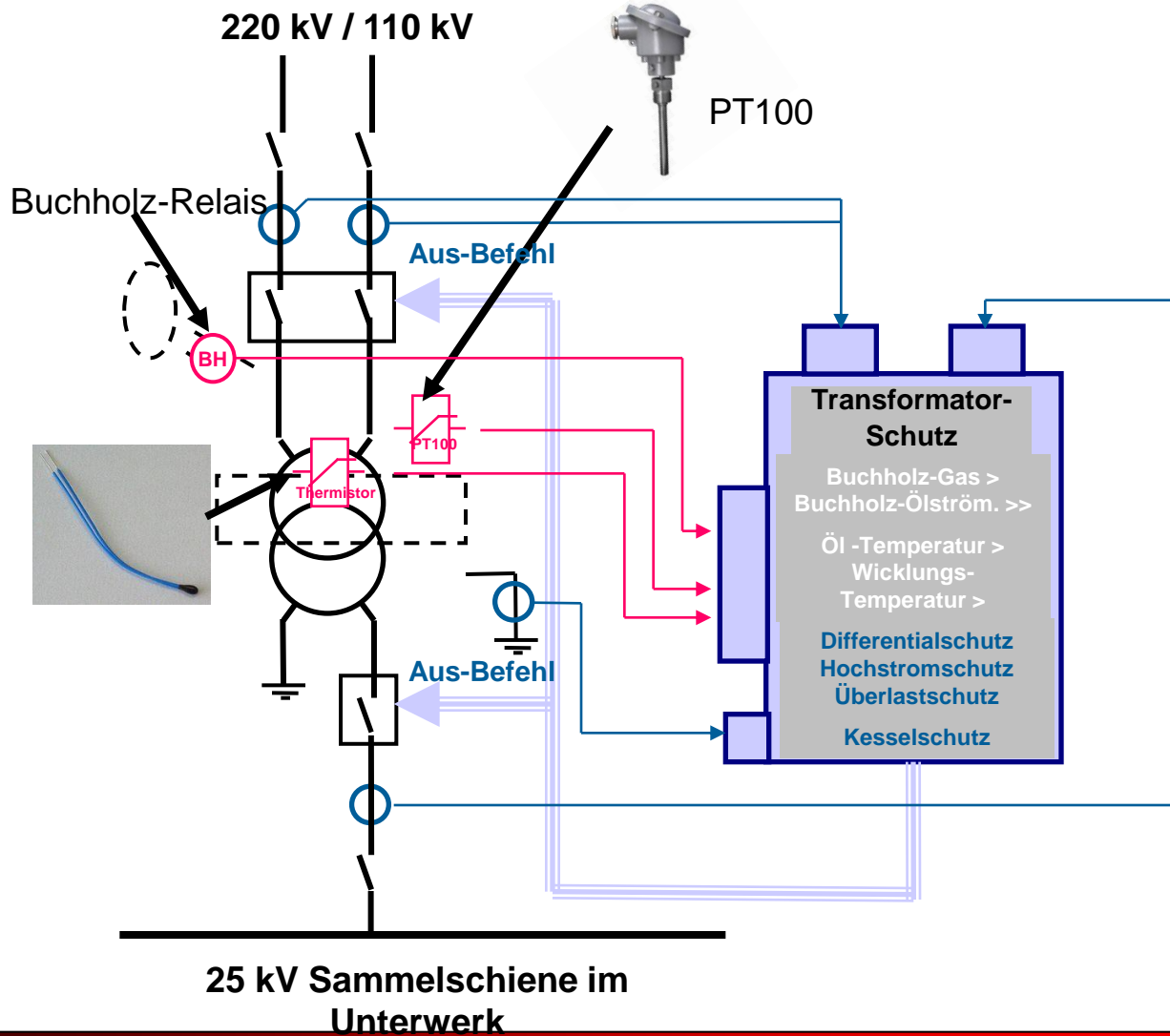
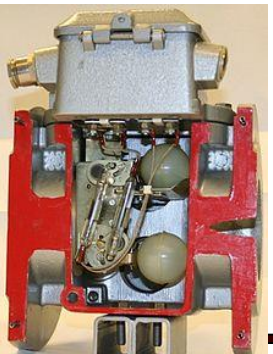
Ergebnis



8 Bahnenergieversorgungssysteme

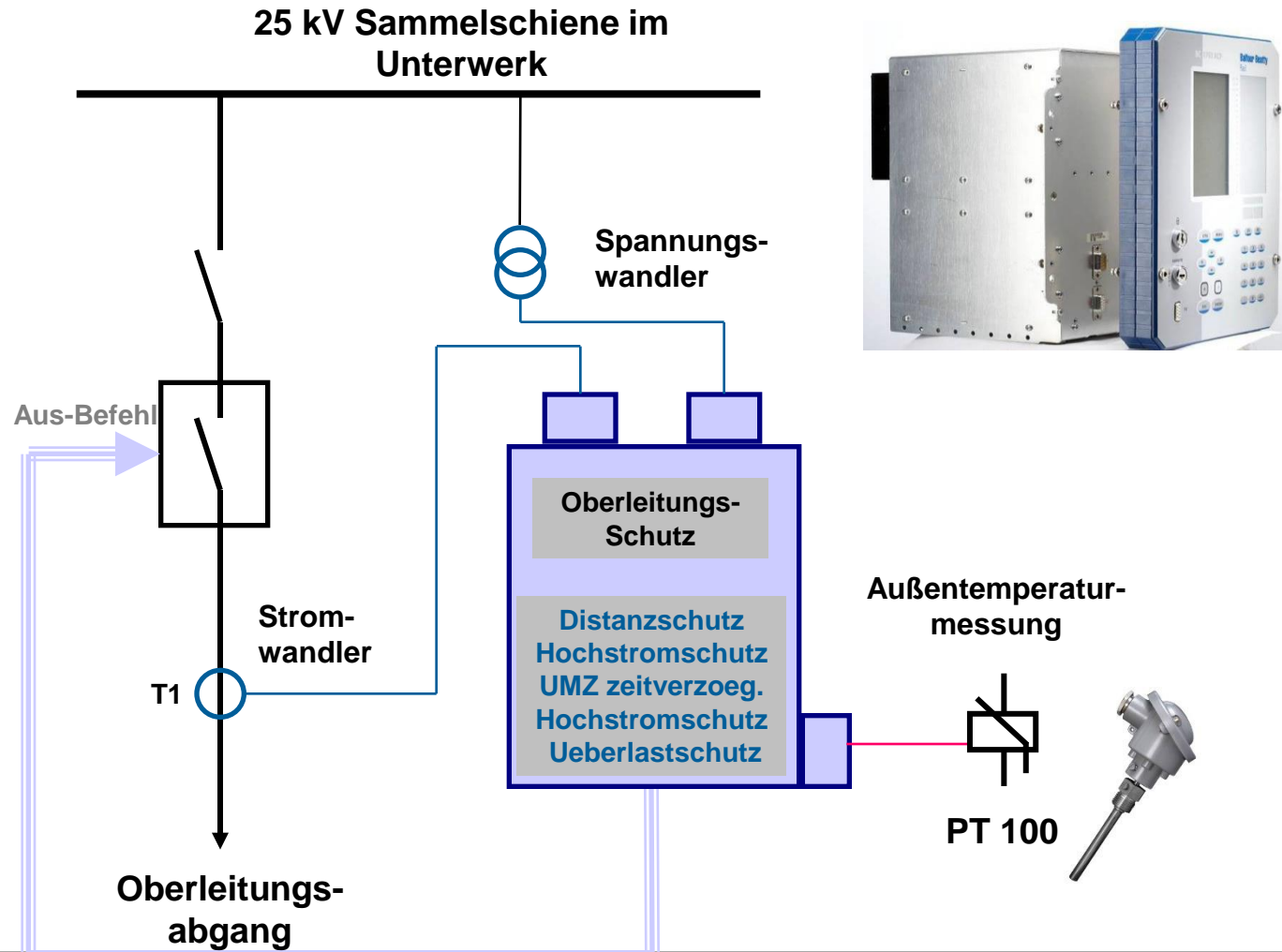
Prinzip des Transformatorschutzes [96]

Erstes Buchholz-Relais 1925



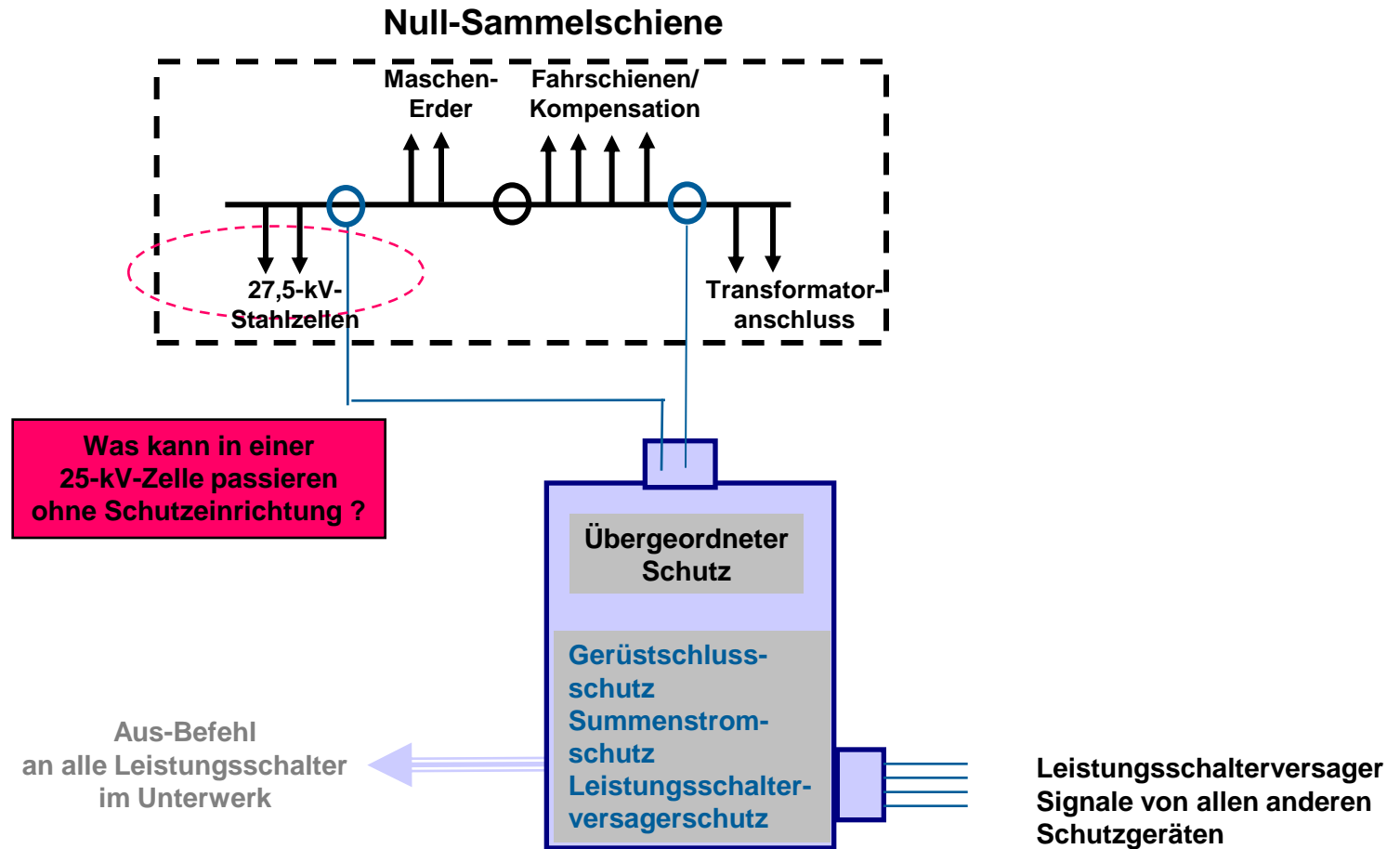
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Prinzip des Oberleitungsschutzes [97]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

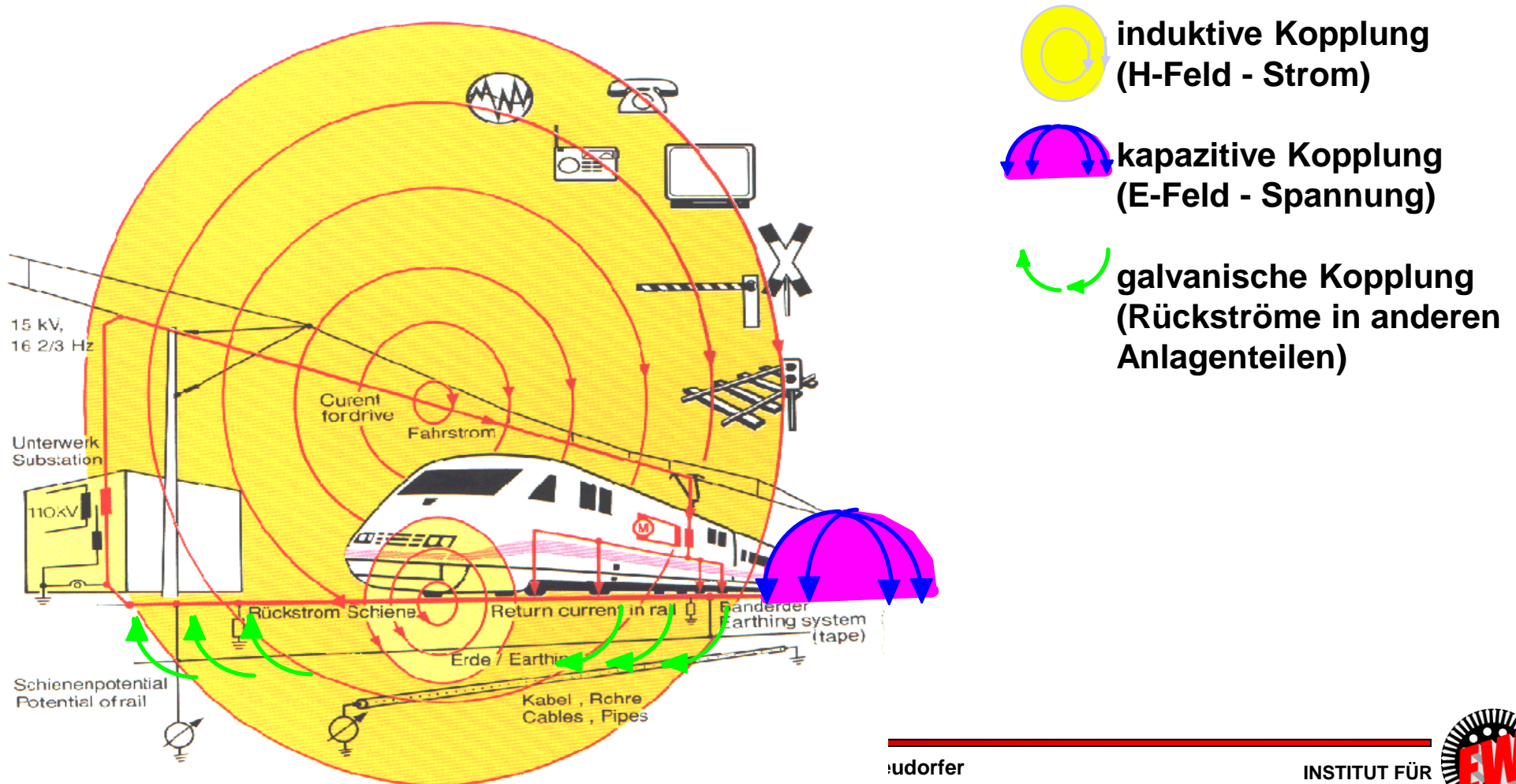
Prinzip des übergeordneten Schutzes im Unterwerk [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

8.4 Probleme der Erdung und Rückstromführung bei Wechselstrombahnen

Elektrische Beeinflussung bei AC-Bahnen [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Beeinflussungsarten bei elektrischen Bahnen

Im Bereich elektrischer Bahnen treten grundsätzlich (in der Regel gemeinsam) 3 Beeinflussungsarten auf:



Galvanische Beeinflussung

Rückwirkung auf andere Anlagen durch Kopplung der Ströme über das Erdreich oder durch metallischen Kontakt mit dem Gleis

typisches Beispiel: Rückströme in Rohrleitungen oder in Kabelmänteln paralleler Anlagen



Kapazitive Beeinflussung

Durch das elektrische Feld werden im Einflussbereich der Oberleitung liegende Leitungen oder Anlagenteile aufgeladen (Influenz). Spannung kann sich nur aufbauen, wenn Anlagen isoliert zur Erde sind.

typisches Beispiel: Spannungsaufladung an einer nicht geerdeten parallelen Oberleitung



Induktive Beeinflussung

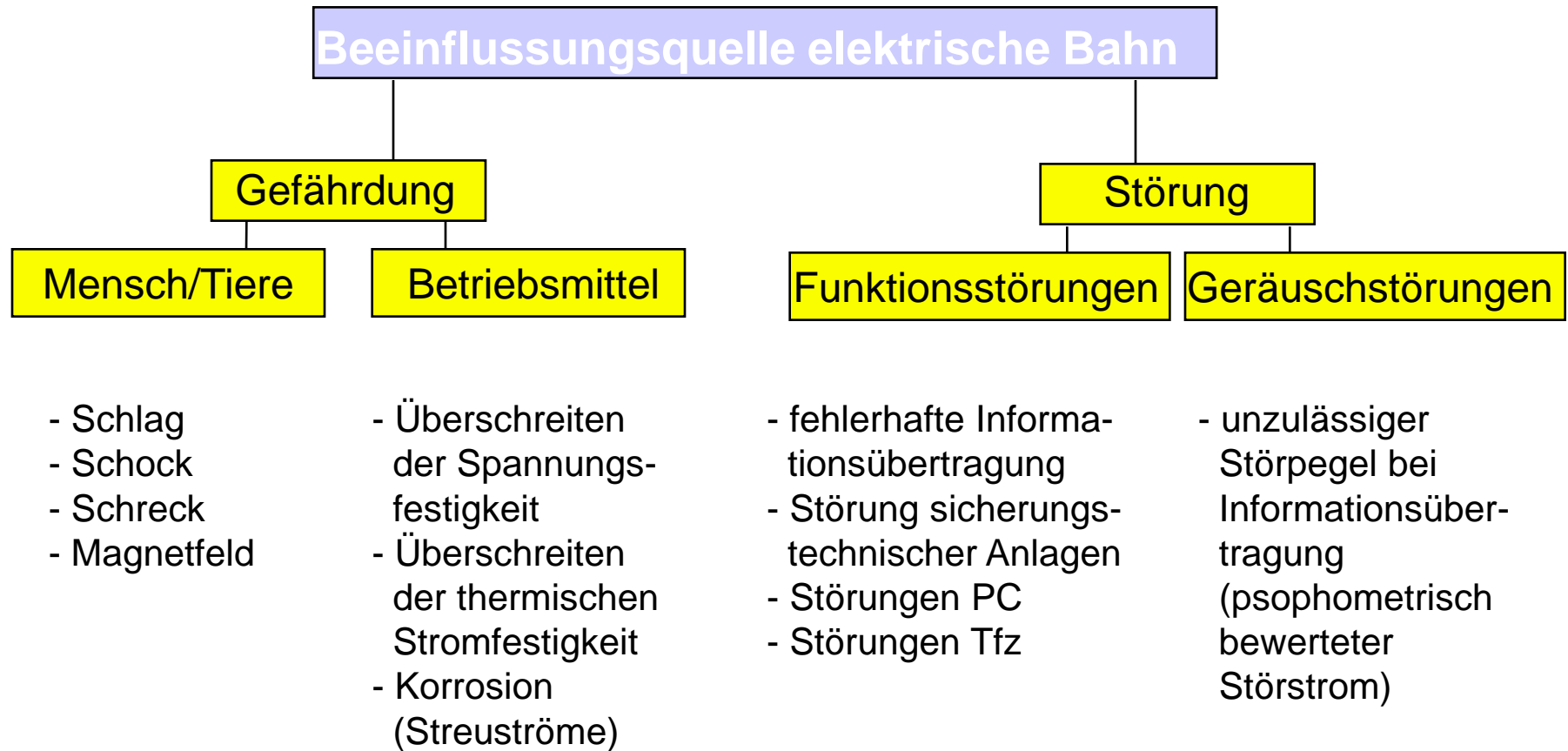
Durch das magnetische Wechselfeld (Grundschiwingung und Oberschwingungen) werden in benachbarten Leiter-Erde-Stromkreisen Spannungen induziert.

typisches Beispiel: Parallele Fernmeldekabel



8 Bahnenergieversorgungssysteme

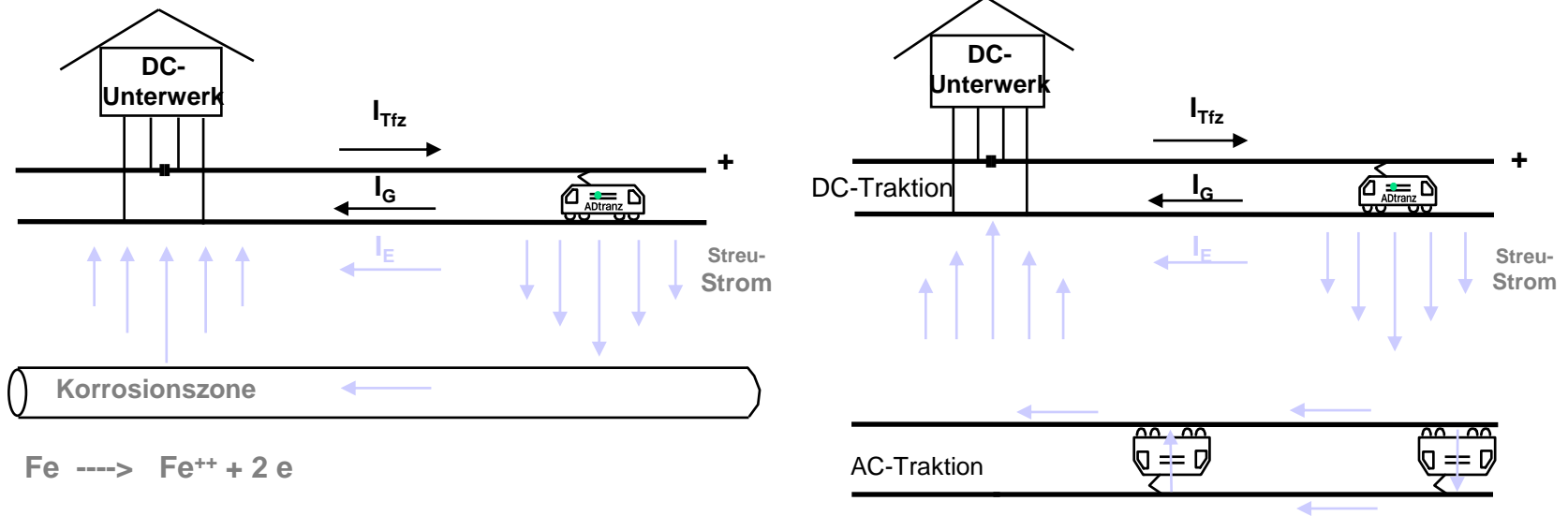
Wirkungen von Beeinflussungen elektr. Bahnen



8 Bahnenergieversorgungssysteme

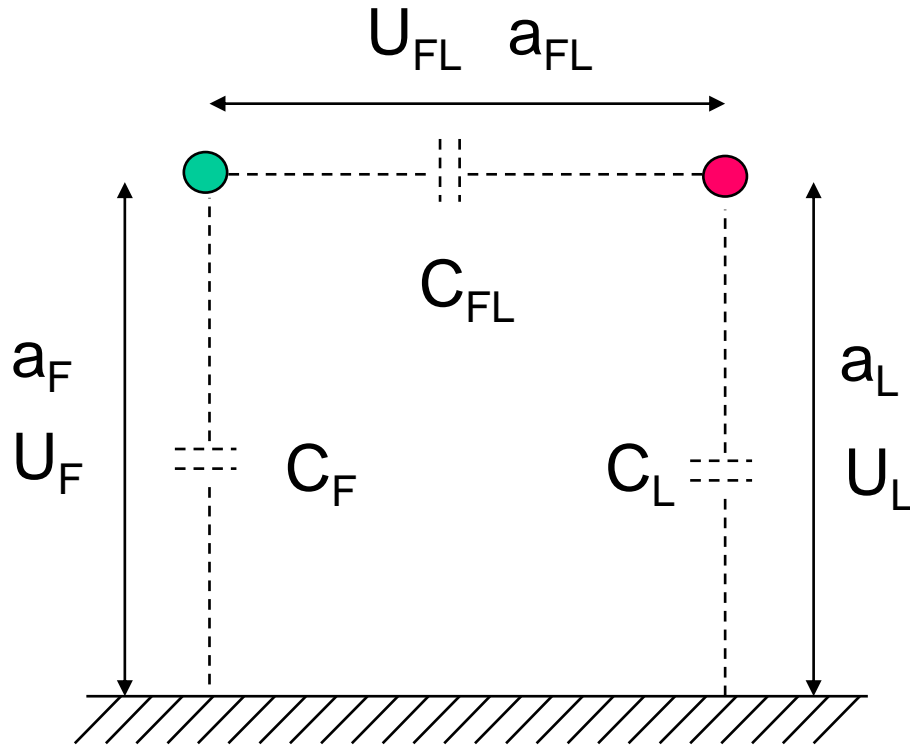
Galvanische Kopplung (Beispiel) [96]

Übertritt von Rückströmen der DC-Bahn in die AC-Bahn

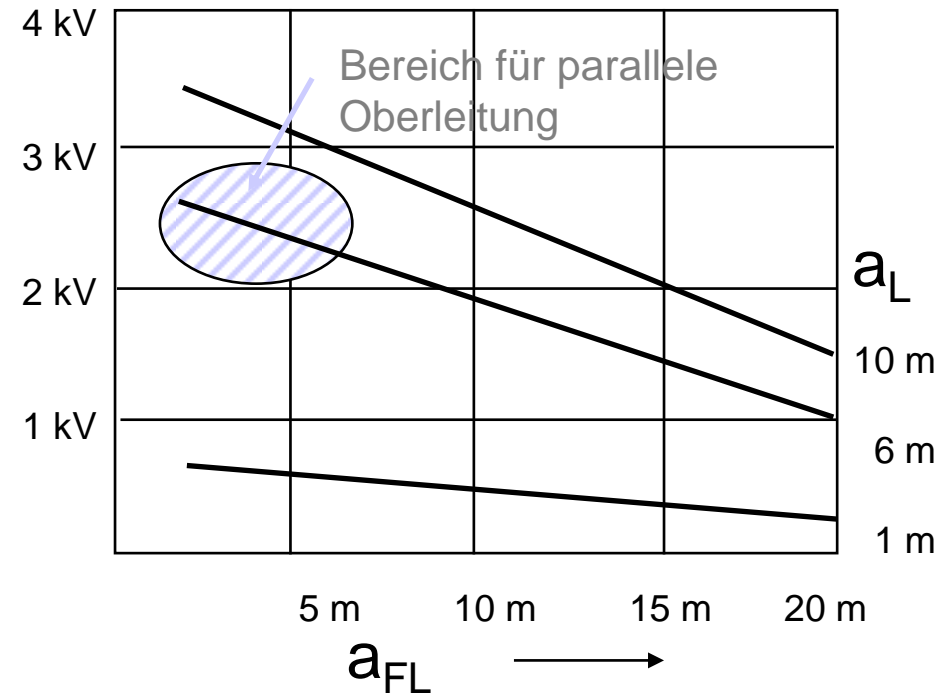


8 Bahnenergieversorgungssysteme

Kapazitive Kopplung (Beispiel) [96]



- Spannungsführende Oberleitung
- Nichtgeerdete parallele Leitung



Influenzierte Spannung:

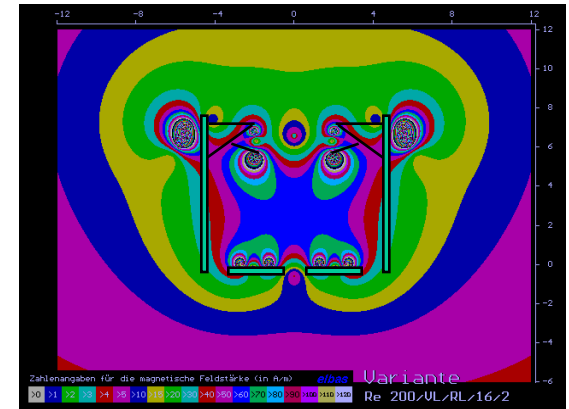
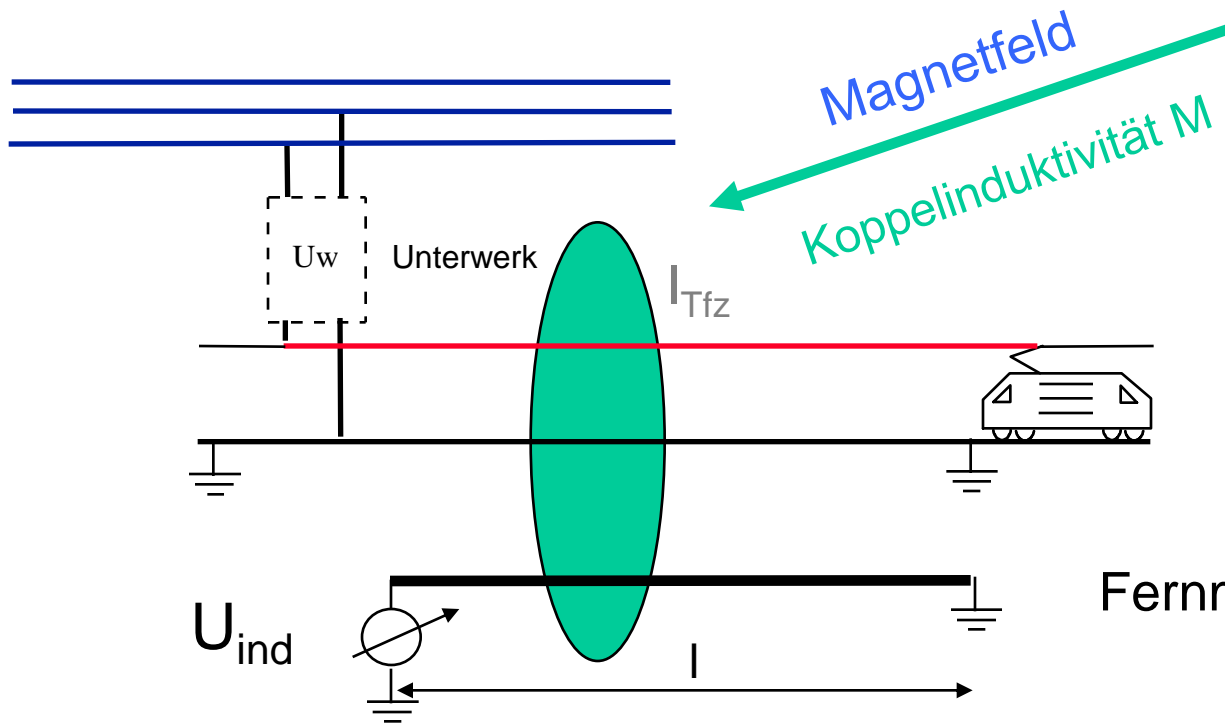
$$U_L = U_F * C_{FL} / (C_L + C_{FL})$$

abgeschaltete Oberleitungen sind zu erden !!!



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Induktive Kopplung (Beispiel) [96]



Induzierte Spannung:

$$U_{ind} = 2\pi f \cdot M \cdot I \cdot r \cdot w \cdot l$$



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Induktive Beeinflussung - Induzierte Spannung [96]

$$U_{ind} = 2\pi f \cdot M \cdot I \cdot r \cdot w \cdot l$$

f - Frequenz

l - Länge der Parallelführung Fernmeldekabel-Strecke

I - beeinflussender Betriebs- oder Kurzschlussstrom

w - Erwartungsfaktor für ungünstigsten Beeinflussungsfall
(nach VDE 0228-3 wird $w = 0,7$ empfohlen)

r - Reduktionsfaktor $r = r_G \cdot r_{RL} \cdot r_K \cdot r_L$

r_G - Gleisreduktionsfaktor

ca. 0,5

r_{RL} - Reduktionsfaktor Rückleiterseil

ca. 0,6

r_K - Reduktionsfaktor des Kabelmantel des
beeinflussten Kabels

ca. 0,1 ... 0,5

r_L - Reduktionsfaktor infolge anderer geerdeter Leiter

ca. 0,7 ... 0,8 (städt.)

ca. 0,9 ... 1,0 (ländl.)

M - Koppelinduktivität

$$M = 0,1 + 0,2 \cdot \ln(400 / (a \sqrt{f / \rho_E}))$$

Formel nach Pollaczek

a - Abstand der Leiter in m

ρ_E

- Bodenleitfähigkeit in Ohm*m

M - in mH/km

f

- Frequenz



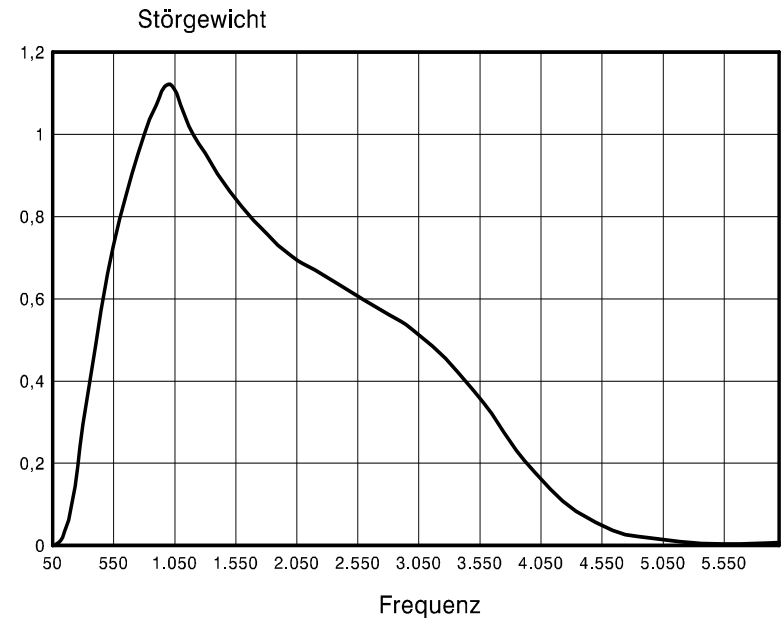
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Psophometrisch bewerteter Störstrom [96]

$$I_{Stör} = \sqrt{\sum (p_f \cdot I_\gamma)^2}$$

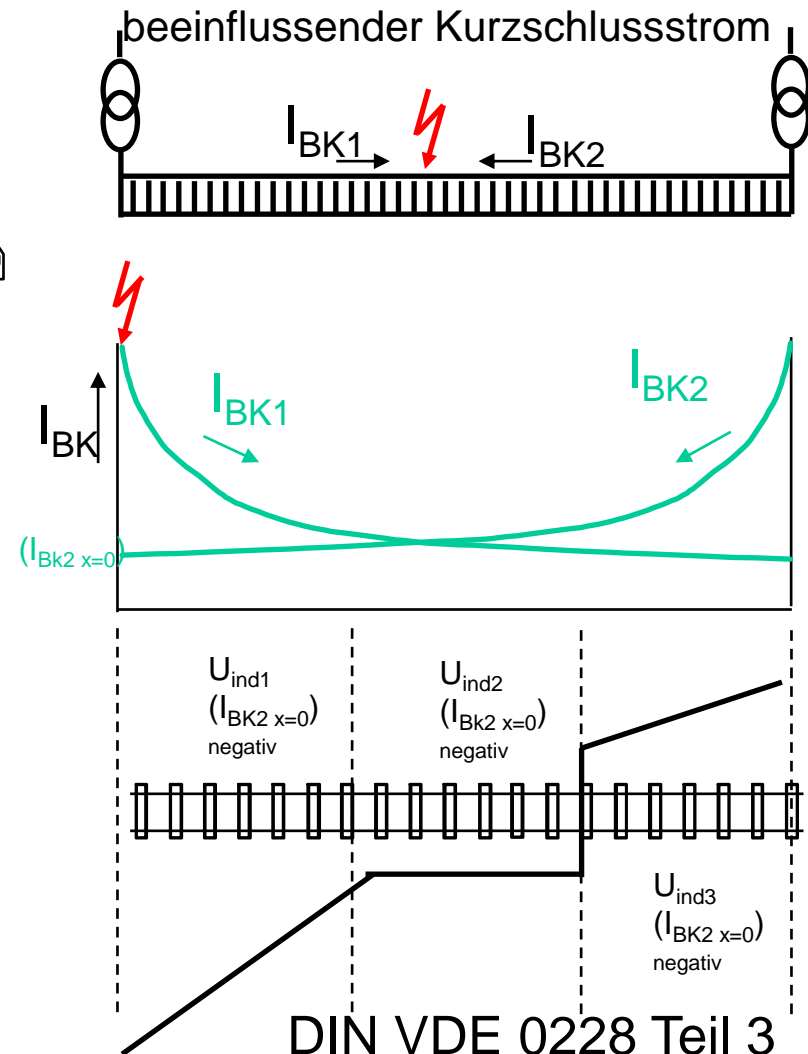
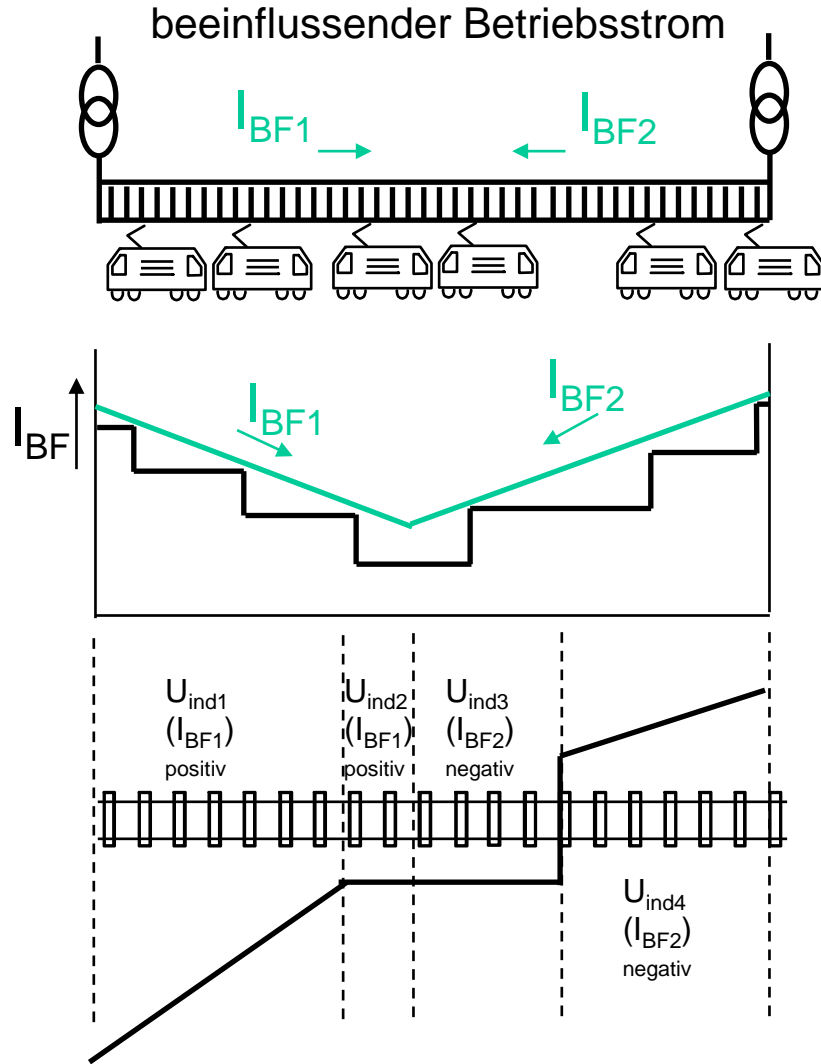
Definition:

Psophometrisch bewerteter Störstrom ist ein äquivalenter Strom von 1000 Hz, der die gleichen (vom menschlichen Ohr) wahrnehmbaren Geräuschstörungen hervorruft, wie der entsprechende Betriebsstrom mit seinen Oberschwingungen



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Induktive Beeinflussung - beeinflussender Betriebs- und Kurzschlussstrom [96]



DIN VDE 0228 Teil 3



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Magnetische Induktion von Geräten und Anlagen [96]

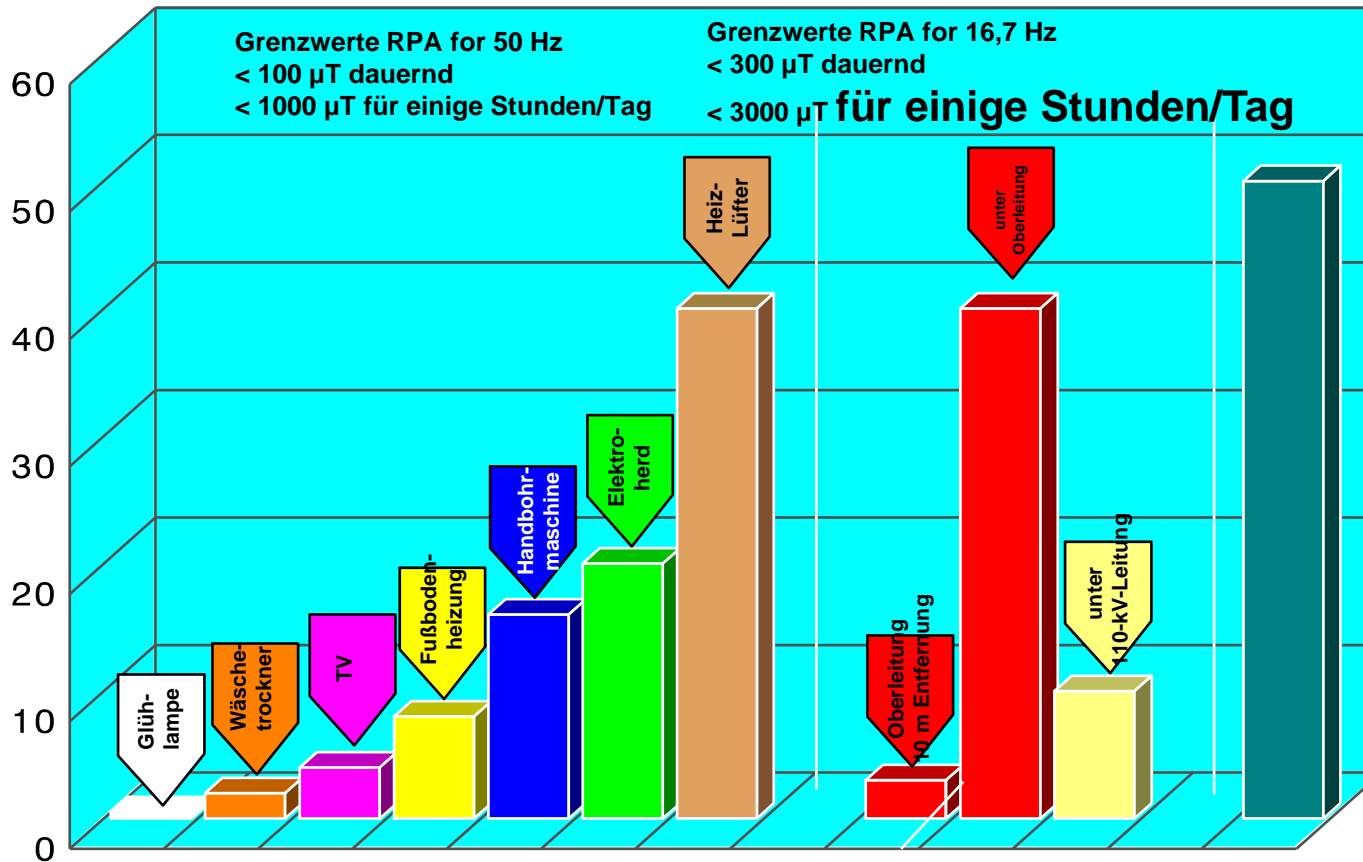
Haushaltsgeräte

im Abstand von 30 cm

Eisenbahnen

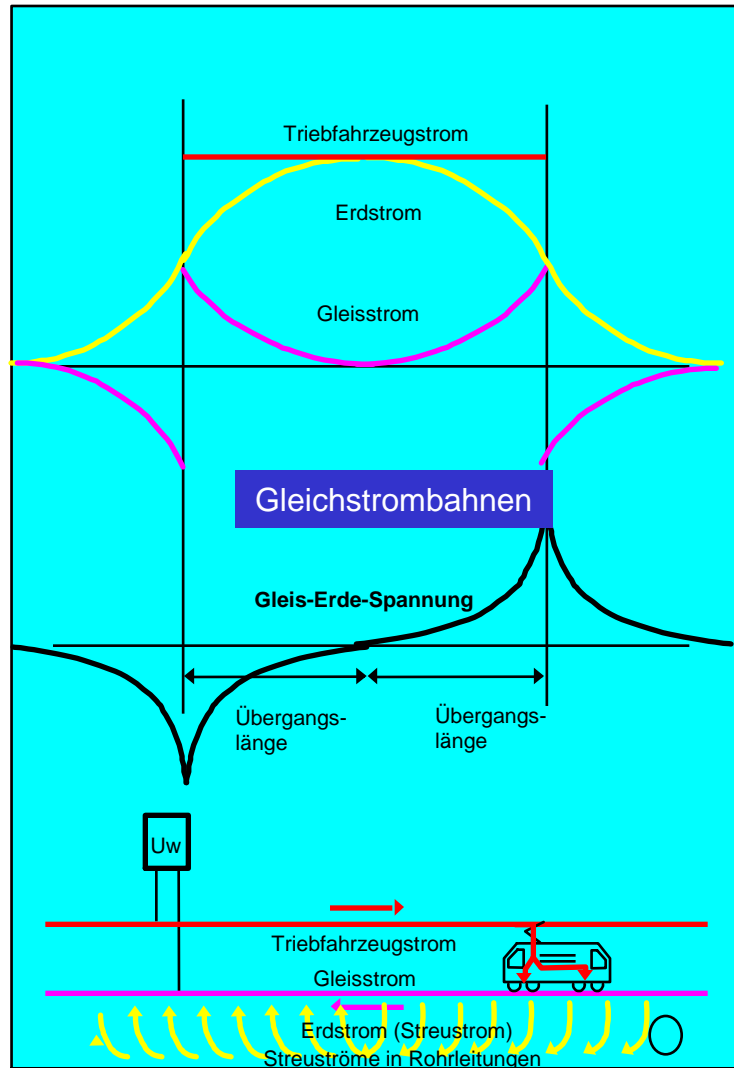
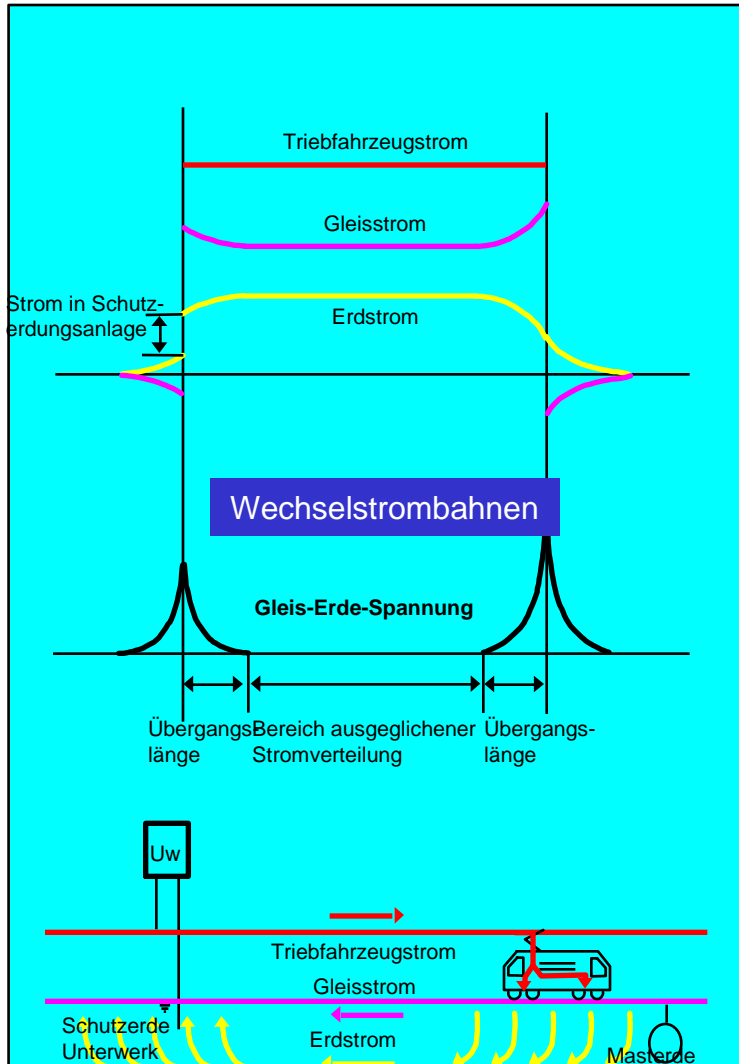
Erd-
Magnetismus

Magnetische Induktion in Micro-Tesla



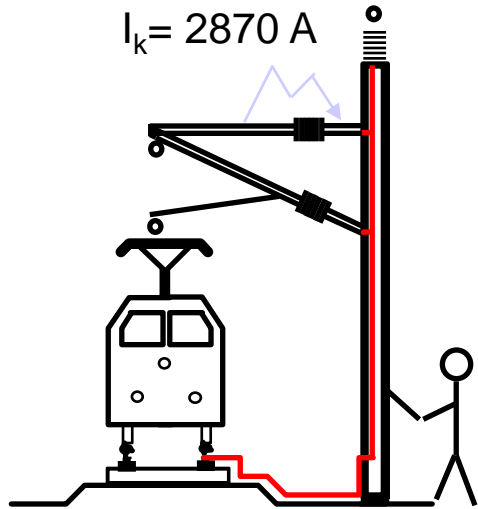
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Rückstromverteilung bei Gleich- und Wechselstrombahnen [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdung bei AC-Bahnen - Gleis-Erde-Spannung / abgreifbare Spannung [96]

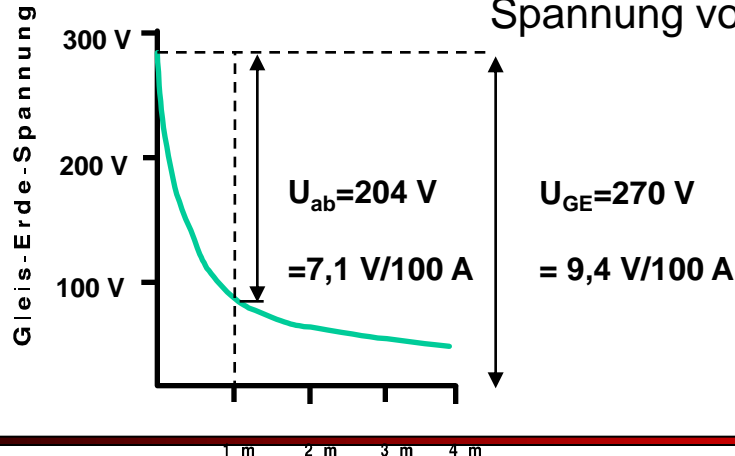


Gleis-Erde-Spannung U_{GE} :

Spannung zwischen Gleis (oder geerdetem Anlagenteil) und entfernter Erde (ca. 200 ... 300 m)

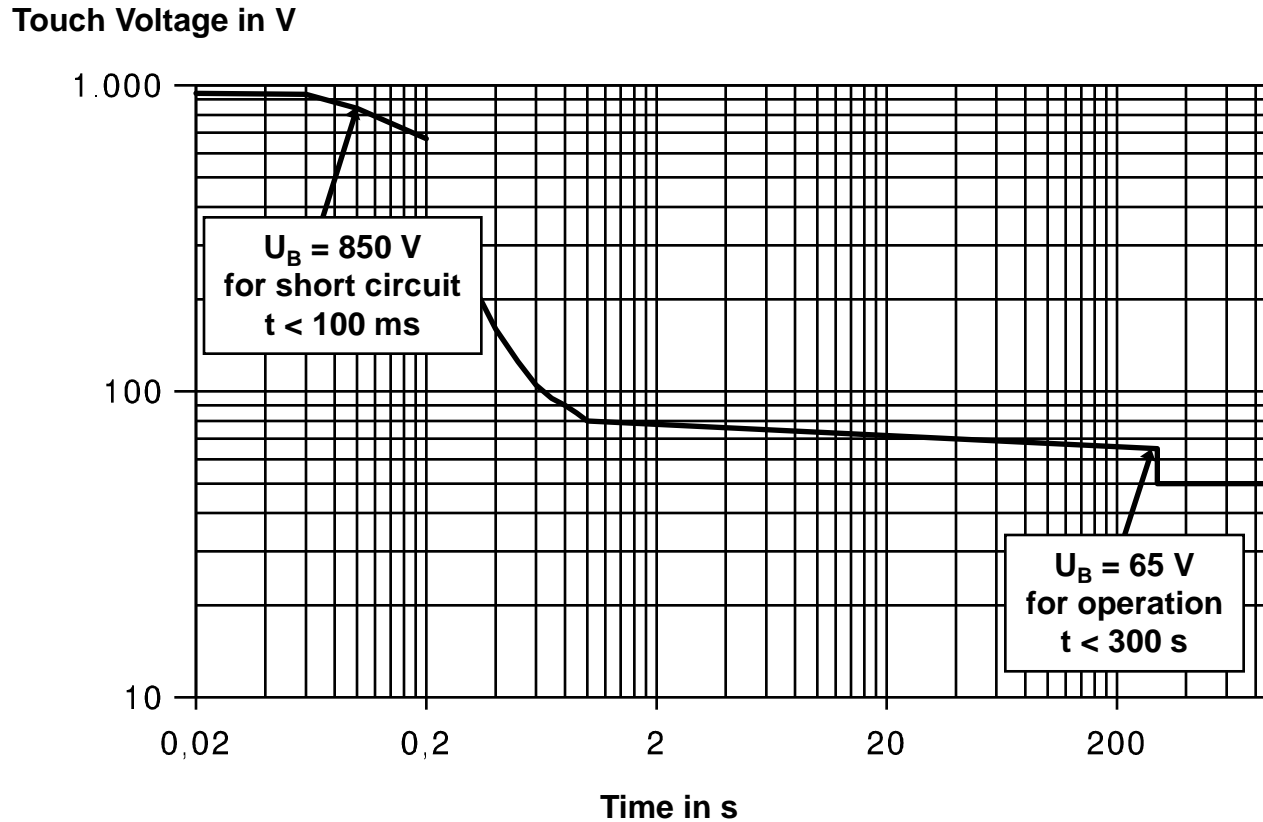
Abgreifbare Spannung U_{ab} :

Durch Personen maximal abgreifbare Spannung (hier von der Gleis-Erde-Spannung)
Für die Bemessung von Bahnenergieversorgungsanlagen wird in Deutschland von einer maximal abgreifbaren Spannung von 50 % ausgegangen. Mutig! Mutig!



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Berührungsspannungen nach prEN 50 122-1



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdung bei AC-Bahnen - Einflüsse auf Gleis-Erde-Spannung

$$U_{GE} = \frac{Z_W}{2} * (1 - k_{RL}) * I$$

mit

$$\text{Wellenwiderstand } Z_W = \sqrt{|z|_{RL} * r_{GE}}$$

$|z|_{RL}$ - Widerstand der Rückleitung (Gleis)

r_{GE} - Widerstand der Gleise und Maste gegen Erde

k_{RL} - Rückleitungsstromfaktor (Anteil des Stromes in Gleis und Rückleiter)

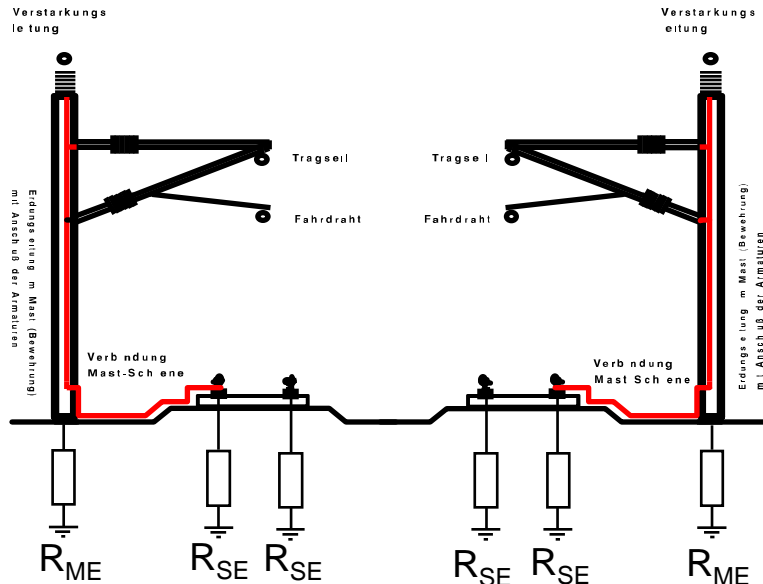
- ➔ Ableitwiderstand Rückleitung-Erde
 - Ableitung Schiene - Erde (Oberbauart W,WK,FFB)
 - Ableitung Maste - Erde
 - Bodenleitfähigkeit
- ➔ Längswiderstand Schienen/Gleise (ein-/zweigleisig/Bahnhof)
- ➔ Anteil Strom in Rückleitungsbahn (Einfluss Rückleiterseile)
- ➔ Maximalströme (Kurzschluss/Betriebsfall)



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdung bei AC-Bahnen - Einflüsse auf Gleis-Erde-Spannung [96]

Entscheidende Größe ist Ableitwiderstand des Rückleitungssystems gegen Erdreich r_{GE} :



R_{ME} - Mastausbreitungswiderstand (Mast gegen ferne Erde)

Beispiele: Betonmast auf Stahlpfahl ca. 5 ... 10 Ohm
 Betonmast mit Gründung in Beton ca. 20 ... 50 Ohm
 Stahlmast in Ortbetonfundament ca. 5 ... 50 Ohm

R_{SE} - Widerstand Schiene-Erde ($R_{SE}/2$ - Widerstand Gleis-Erde)

Beispiele: konventioneller schmutziger Oberbau ca. 5 ... 10 Ohm*km
 (trocken) W-Oberbau ca. 10 ... 20 Ohm*km
 Wk-Oberbau (isolierte Schiene) ca. 20 ... 40 Ohm*km
 Feste Fahrbahn > 20 Ohm*km

Für 2-gleisige Strecken ergibt sich bei durchschnittlich 15 Maste je Gleis und Km und 15 Ohm je Mast ein Ableitwiderstand bezogen auf 1 km von 0,5 Ohm*km.

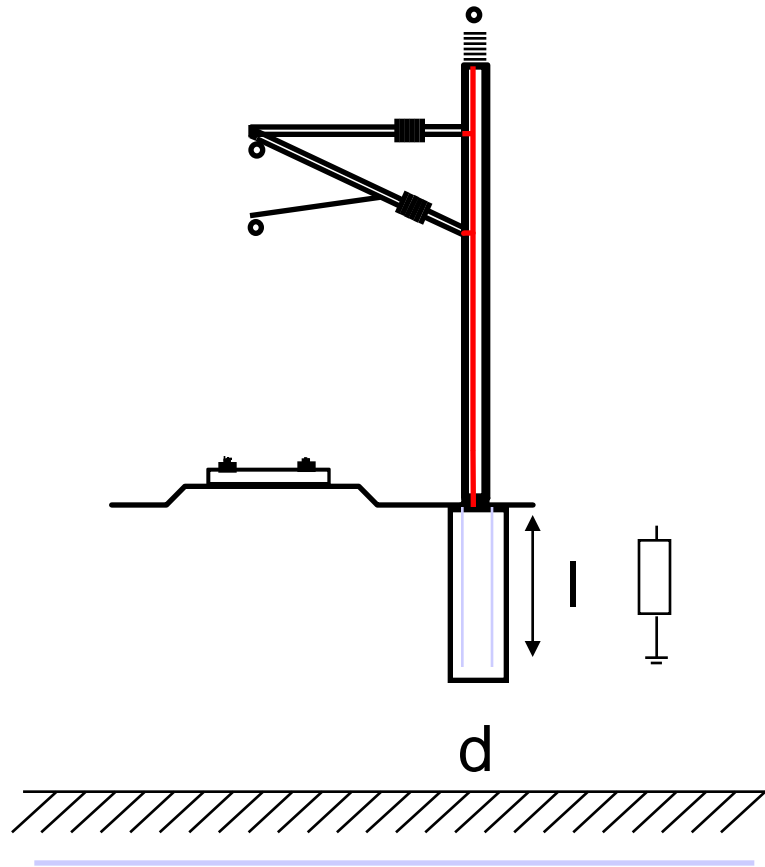
Die Ableitung Schiene(Gleis)-Erde beeinflusst diesen Wert kaum (Senkung auf 0,45 Ohm*km bei schlechtestem Oberbau!!!!)

➔ Voraussetzung für die Einhaltung der Berührungsspannungen im Gleisbereich ist die Erdung aller Maste am Gleis !!!



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdausbreitungswiderstände [96]



Mastausbreitungswiderstand:

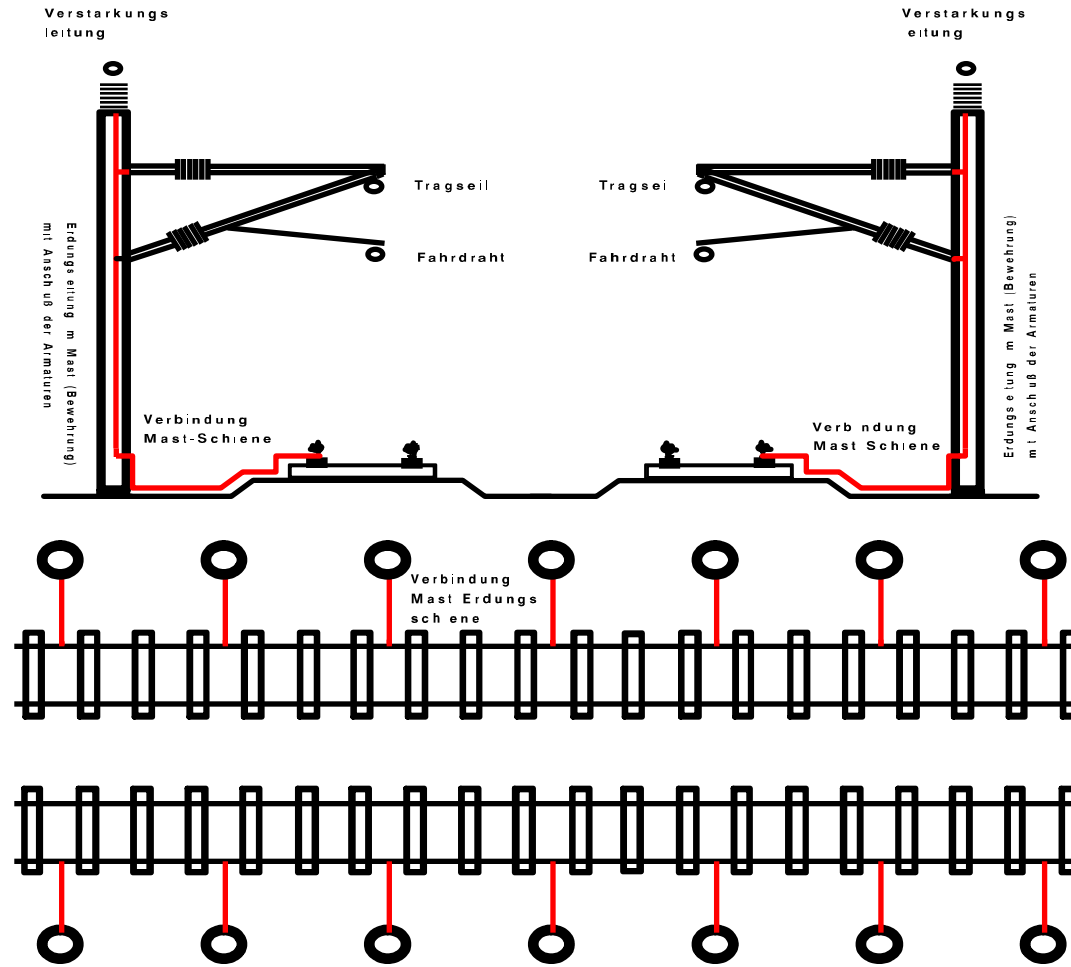
$$R_M = \frac{\delta}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d}$$

Erdungswiderstand Banderde:

$$R_B = \frac{\delta}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l}{d}$$

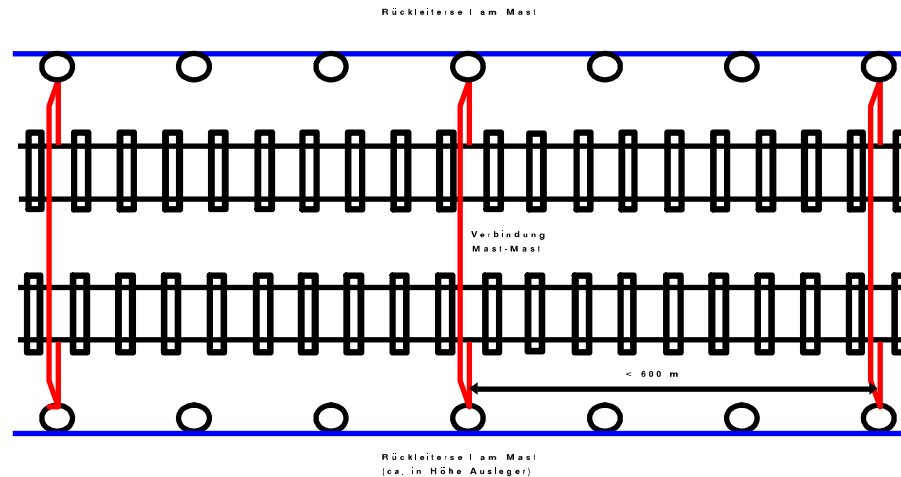
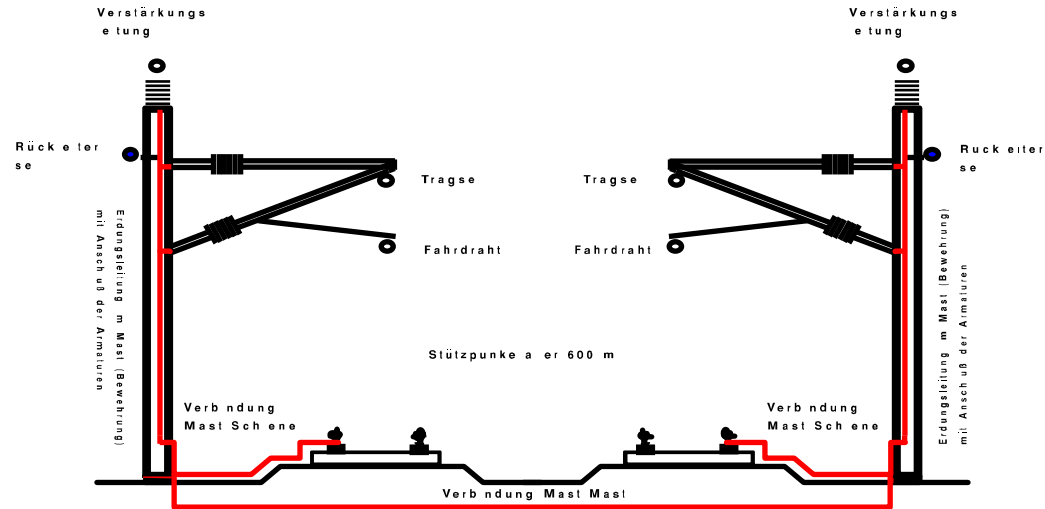
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdung und Rückstromführung - Masterdung AC (konventionell) [96]



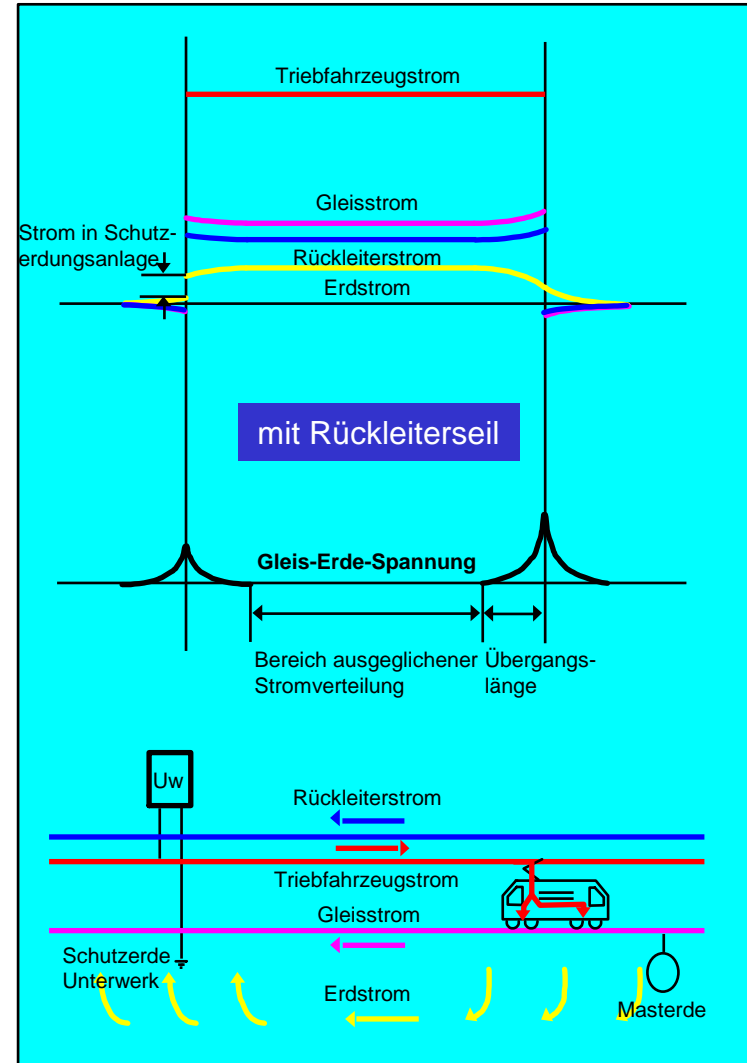
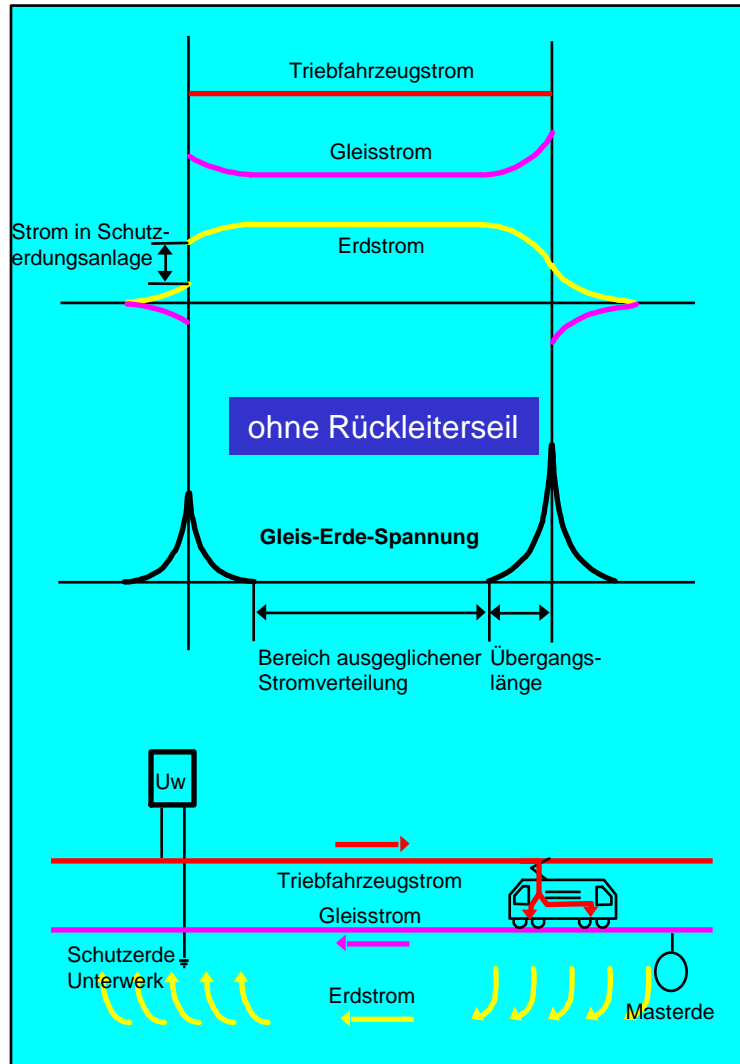
8 Bahnenergieversorgungssysteme

Erdung und Rückstromführung - Masterdung AC (mit Rückleiterseil) [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

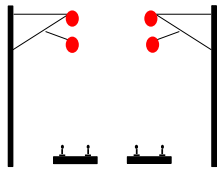
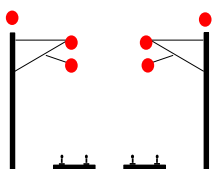
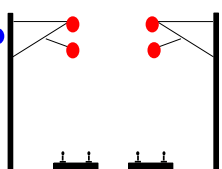
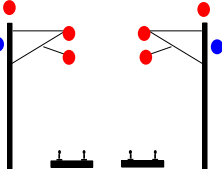
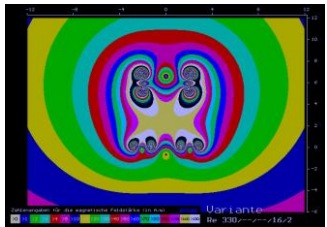
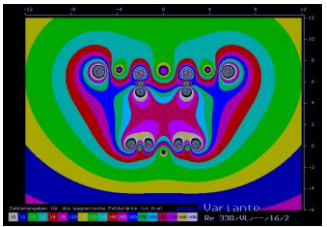
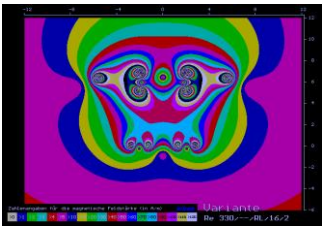
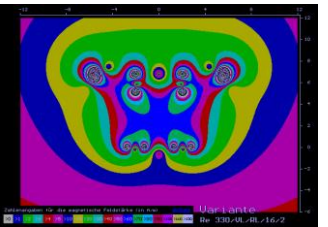
Rückstromverteilung bei Wechselstrombahnen [96]



8 Bahnenergieversorgungssysteme

Elektrische Kenngrößen Re 330 (15 kV/16,7 Hz) [97]

Tool **IMAFEB** - Berechnung von Impedanzen/Magnetfeldern/Gleis-Erde-Spannungen/Beeinflussungen

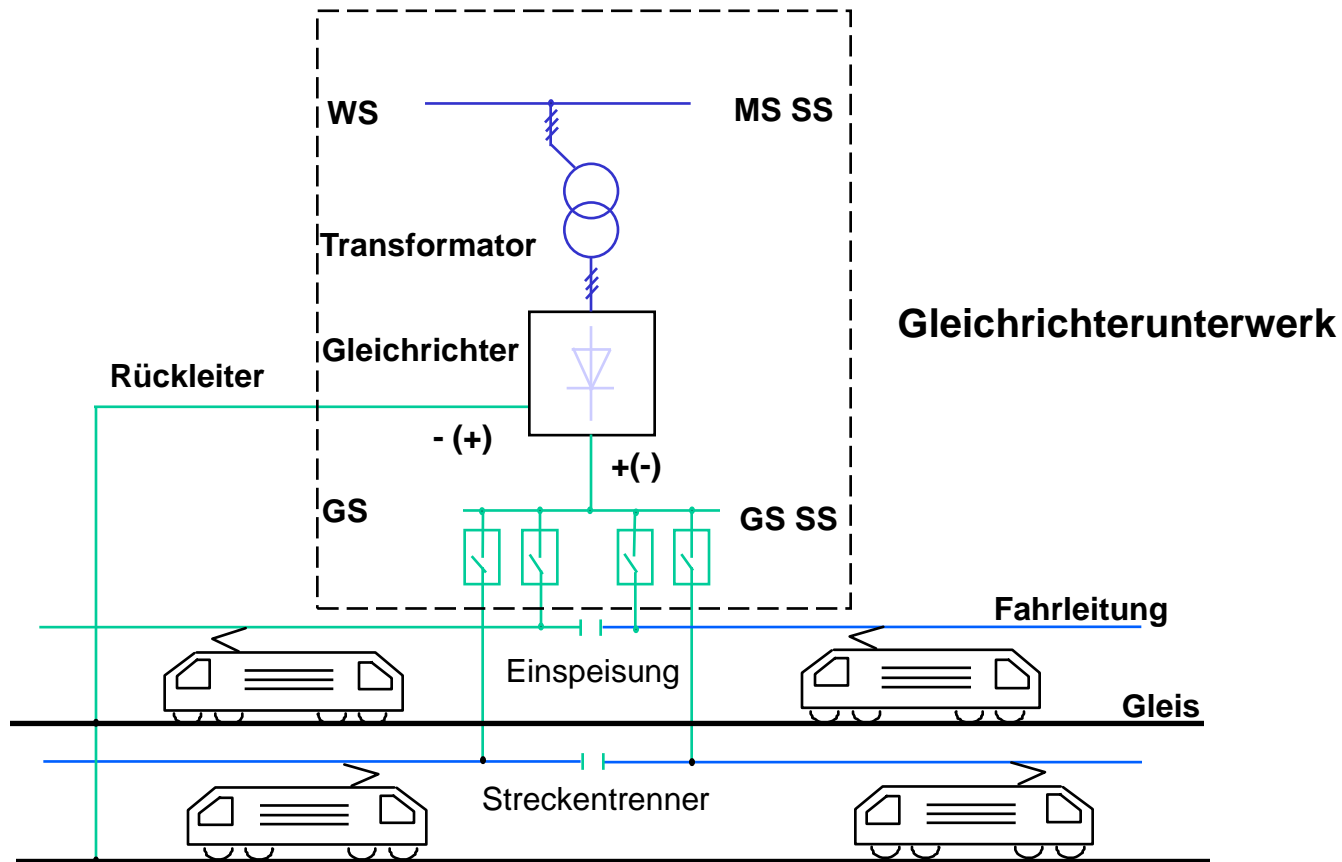
Re 330 für 15 kV/16,7 Hz	Oberleitung ohne Verstärkungsleitung / ohne Rückleiterseil	Oberleitung mit Verstärkungsleitung / ohne Rückleiterseil	Oberleitung ohne Verstärkungsleitung / mit Rückleiterseil	Oberleitung mit Verstärkungsleitung / mit Rückleiterseil
				
Impedanz in Ω/km (2gl. Strecke)				
Resistanz	0,0928	0,0609	0,0810	0,0504
Reaktanz	0,0911	0,0753	0,0683	0,0460
Impedanz	0,1301	0,0969	0,106	0,0682
Phasenwinkel in $^\circ$	44,5	51,0	40,1	42,4
Stromverteilung in %				
Kettenwerke	100	53	100	51
Verstärkungsleitungen	-	47	-	49
Rückleiterseile	-	-	39	43,9
Gleise	64,43	62,9	42,5	38,6
Gleis-Erde-Spannung in V/100A	4,8	4,87	1,97	1,87
Dauerstrombelastbarkeit in A	2 x 850	2 x 1425	2 x 850	2 x 1425
Beeinfl.-spannung in V/kAkm	46,08	45,7	24,9	22,8
Magnet. Feldbild (Querprofil) (Jedes Kettenwerk 1000 A)				



8 Bahnenergieversorgungssysteme

GS-Bahnstromversorgung [96]

Aufbau von Bahnenergieversorgungsnetzen von Gleichstrombahnen

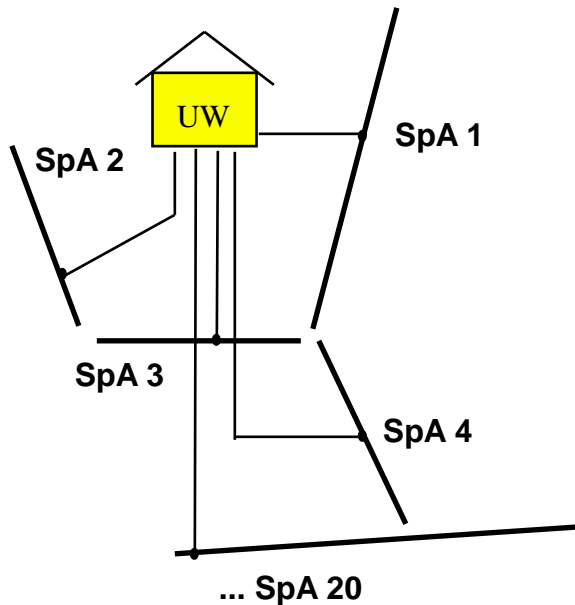


8 Bahnenergieversorgungssysteme

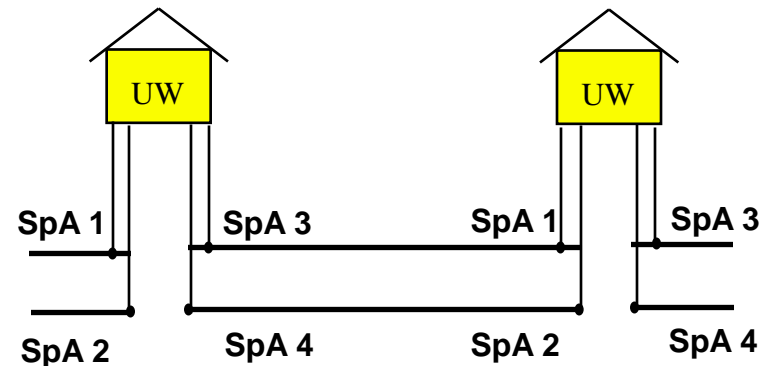
GS-Bahnstromversorgung [96]

Aufbau von Bahnenergieversorgungsnetzen von Gleichstrombahnen

zentrale Netze (große UW)
überwiegend einseitig gespeist
bis zu 20 Speiseabschnitte je UW



dezentrale Netze (kleine UW)
überwiegend zweiseitig gespeist
selten mehr als 4 Speiseabschnitte je UW



- 9 Auslegung von Antriebssystemen**
- 9.1 Spezifikation eines Traktionsmotors für eine S-Bahn
- 9.2 Auslegungsbeispiel des Antriebes für eine
Universallokomotive
- 9.3 Mechanische Probleme
- 9.4 Thermische Probleme
- 9.5 Akustische Probleme



9.1 Spezifikation eines Traktionsmotors für eine S-Bahn

System

Raddurchmesserunterschied 0,4%

Asynchronmaschine mit GTO- Wechselrichter

Mechanische Daten

Leistung S2 1hkW bei bis min⁻¹

Nennleistung S1 kW bei min⁻¹

Nennmoment Nm bei min⁻¹

Kurzschlussmoment 5 - 6 faches Nennmoment

Schockbeanspruchung lateral: 3g, transversal: 5g, vertikal: 20g

Vibration VDE 0115 Teil 2

Elektrische und thermische Daten

Nennspannung V bei Hz, V bei Hz

Polpaarzahl ..

Nennfrequenz Hz

Kurzschlussinduktivität mH

Oberschwingungsbelastung 8 - 12% der Grundsicherungsverluste

Geräuschabstrahlung nach Norm bzw. Bericht ...

Thermische Ausnutzung Isolationsklasse : Klasse 200



9 Auslegung von Antriebssystemen

Umweltbedingungen

Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Fremdstoffe (Salznebel, Schnee, Staub, Wasser, Bremsstaub,...) , Reinigung (Substanzen, ph- Werte, Zusammensetzung,...)

Kühlung

Luftkühlung, Flüssigkeitskühlung, Volumenstrom, max. Druckabfall, Temperatur,..

Schutzart

IP.. nach DIN40050

Anstrich

Außenanstrich, Innenanstrich, Schichtdicke, Farbe RAL....

Konstruktion

Schnittstellen zu Drehgestell,nach Maßbild max. Masse....kg, Momentenübertragung, Wälzlager, Lagerschmierung mit Nachschmierfristen und Lagerlebensdauer, Anschlußkasten mit Kabelquerschnitt, Wuchtgüte nach DIN ISO 1940,

Drehzahlerfassung

Impulsgebertype bzw. System



9 Auslegung von Antriebssystemen

Bestimmungen

Normen: VDE 0535, DIN 57535, EN 60349...

Prüfungen und Messungen

Normen: VDE 0535, ICE 349 Teil1 und 2,...Leerlauf,- Kurzschluß,- Erwärmungs,-
messungen, Geräuschmessungen, Stückprüfungen, Güteprüfungen
Prüfspannung, Schwingungsmessungen

Unterlagen und Dokumentation

Wartungs- und Prüfvorschrift, Zeichnungen inkl. Stücklisten, Fotos

Lebensdauer

30 Jahre, Hauptuntersuchungsintervall 1 500 000 km

Umweltschutz

umweltgerechte Entsorgung, Materialkennzeichnungen

Lieferumfang

Bauteile, Definition der Schnittstellenbauteile (Schrauben, Kupplungen,

Anlagen

Schnittstellenzeichnungen, Maßbilder, Datenblätter, Dokumentation,
Bedienungs- und Wartungsanweisung (in Landessprache)



9 Auslegung von Antriebssystemen

9.2 Auslegungsbeispiel des Antriebes für eine Universallokomotive [81]

9.2.1 Z-v-Diagramm, Leistungsermittlung (1/2)

	Masse mit Lok m_i	Geschwindigkeit v_i	Steigung s_i
Intercityzug (Nr. 1) : (mit $n_1 = 15$ Wagen)	570 t	220 km/h	5 ‰
Ganzgüterzug (Nr. 2):	2200 t	120 km/h	5 ‰
Gemischter Güterzug (Nr. 3):	2000 t	75 km/h	10 ‰

* Fahrtwiderstand (allg.): $w = w_f + w_b + w_s + w_a$ (hier mit $w_a = w_b = 0$)

w_f : SAUTHOFF $w_{f1} = 1 + 0,0025 \cdot v_1 / \text{km/h} + 4,8 \cdot (n_1 + 2,7) / G_z / \text{kN} \cdot 0,0145 \cdot (v_1 / \text{km/h} + 15)^2 = 13,72 \text{ ‰}$

STRAHL $w_{f2} = 1 + 0,0002 \cdot v_2^2 = 3,88 \text{ ‰}$

$w_{f3} = 2,5 + 0,0005 \cdot v_3^2 = 5,3 \text{ ‰}$

w_s : $w_s = s$ $w_{s1} = s_1 = 5 \text{ ‰}$ $w_{s2} = s_2 = 5 \text{ ‰}$ $w_{s3} = s_3 = 10 \text{ ‰}$

$\Rightarrow \underline{w_1 = 18,72 \text{ ‰}}$ $\underline{w_2 = 8,88 \text{ ‰}}$ $\underline{w_3 = 15,3 \text{ ‰}}$

* Zugkraft: $Z_i = w_i \cdot m_i \cdot g$ $Z_1 = 104,7 \text{ kN}$ $Z_2 = 191,65 \text{ kN}$ $\underline{Z_3 = 300,2 \text{ kN} = Z_{AN}}$

* Leistung: $P_i = Z_i \cdot v_i$ $P_1 = 6,38 \text{ MW}$ $\underline{P_2 = 6,39 \text{ MW} = P_N}$ $P_3 = 6,25 \text{ MW}$

* Geschwindigkeit bei Nennleistung: $\underline{v} = P_N / Z_{AN} = 6390 \text{ /kW} / 300,2 \text{ /kN} = 21,3 \text{ m/s} = 76,7 \text{ km/h}$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Z-v-Diagramm, Leistungsermittlung (2/2)

* CURTIUS-KNIFFLER $f_x = 7,5/(v[\text{km/h}] + 44) + 0,161$

Reibungszugkraft: $F_\mu = f_x \cdot m_{Lok} \cdot g$ $F_\mu (v = 0 \text{ km/h}) = 273,13 \text{ kN}$ $F_\mu (v = 220 \text{ km/h}) = 156,08 \text{ kN}$

(mit $m_{Lok} = 84 \text{ t}$)

* Beschleunigung in der Ebene ($w_s = 0$):

Stillstand: $w_1 = 1,05$

$w_2 = 1$

$w_3 = 2,5$

Anfahrwiderstand: $F_1 = 5,87 \text{ kN}$

$F_2 = 215,6 \text{ kN}$

$F_3 = 49,05 \text{ kN}$

Mit $m_i \cdot a_i = Z_A - F_i$ $a_1 = 0,516 \text{ m/s}^2$

$a_2 = 0,126 \text{ m/s}^2$

$a_3 = 0,125 \text{ m/s}^2$

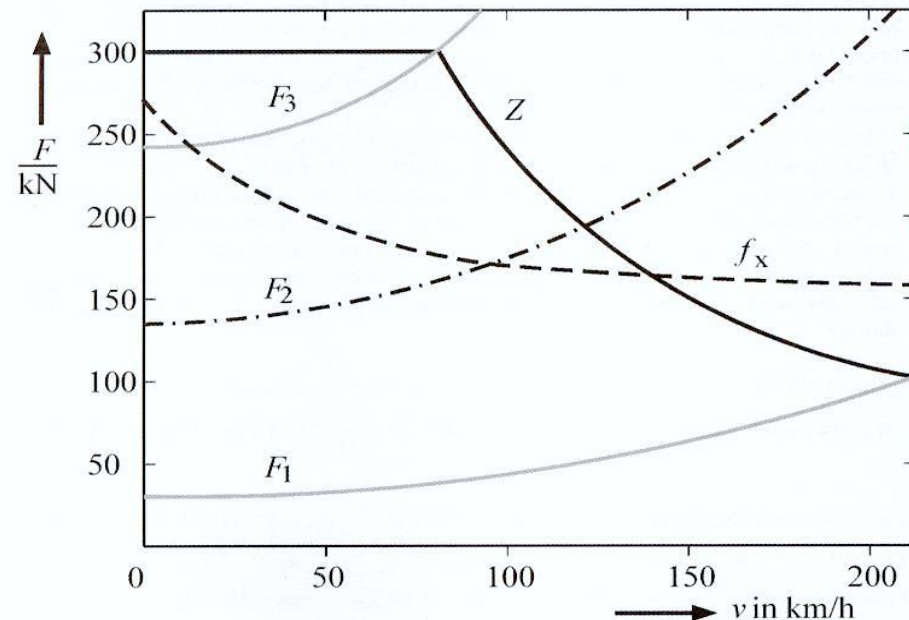


Bild 9.1 F-v-Diagramm [81]



9 Auslegung von Antriebssystemen

9.2.2 Mechanische Auslegung (1/2) [81]

Vierachsige Drehgestelllokomotive, Dienstmasse $m_{Lok} = 84 \text{ t}$

Radsatzabstand	$2a = 3000 \text{ mm}$	Raddurchmesser	$D_{Rad} = 1250 \text{ mm}$
Drehgestellmittenabstand	$2b = 9900 \text{ mm}$	max. Radreifenabnutzung	$\delta_{Rad} = 40 \text{ mm}$
Zughakenkraft	$F_H = 300 \text{ kN}$	max. Geschwindigkeit	$v_{max} = 220 \text{ km/h}$
Zughakenhöhe über SO	$h_H = 1030 \text{ mm}$	max. Motordrehzahl	$n_{max} = 3950 \text{ min}^{-1}$

* Angriffspunkt der Zugkraftanlenkung im Drehgestell (über SO):

Vordere Drehgestell (entlastet): $F_{zDG1} = \frac{1}{2} \cdot [G_{Lok} - F_H \cdot (h_H - h_D) / b]$

Statische Aufstandskraft pro Drehgestell: $F_{stat} = \frac{1}{2} \cdot G_{Lok}$

Bedingung: $F_{zDG1} > 0,95 \cdot F_{stat}$

$$\frac{1}{2} \cdot [G_{Lok} - F_H \cdot (h_H - h_D) / b] > 0,95 \cdot \frac{1}{2} \cdot G_{Lok} \Rightarrow \underline{h_D > 350 \text{ mm}}$$

* Aufstandskräfte und prozentuale Radentlastung: (Nummerierung der Achsen in Fahrtrichtung von 1 bis 4)

$$\underline{F_{Z1} = \frac{1}{4} \cdot [G_{Lok} - F_H \cdot ((h_H - h_D) / b + h_D / a)] = 178,2 \text{ kN}}$$

$$\underline{F_{Z2} = \frac{1}{4} \cdot [G_{Lok} - F_H \cdot ((h_H - h_D) / b - h_D / a)] = 213,2 \text{ kN}}$$

$$\underline{F_{Z3} = \frac{1}{4} \cdot [G_{Lok} + F_H \cdot ((h_H - h_D) / b - h_D / a)] = 198,8 \text{ kN}}$$

$$\underline{F_{Z4} = \frac{1}{4} \cdot [G_{Lok} + F_H \cdot ((h_H - h_D) / b + h_D / a)] = 233,8 \text{ kN}}$$

$$F_{ref} = \frac{1}{4} \cdot G_{Lok} = 206 \text{ kN}$$

und

$$E_{Zi} = 100 \cdot (1 - F_{Zi} / F_{ref})$$

$$\underline{E_{Z1} = 13,5 \% \text{ (entl.)}}$$

$$\underline{E_{Z2} = -3,5 \% \text{ (bel.)}}$$

$$\underline{E_{Z3} = 3,5 \% \text{ (entl.)}}$$

$$\underline{E_{Z4} = -13,5 \% \text{ (bel.)}}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Mechanische Auslegung (2/2) [81]

* Max. Getriebeübersetzung i_{max} : $i_{max} = n_{max}/n_{Rad}$

Mit abgenutzten Radreifen:

$$D_{min} = D_{Rad} - 2 \cdot \delta_{Rad} = 1170 \text{ mm}$$

$$n_{Rad} = v_{max}/U_{Rad} = v_{max}/(\pi \cdot D_{min}) = 997,6 \text{ min}^{-1} \Rightarrow \underline{i_{max} \leq 3,96}$$

* Drehmoment des höchstbelasteten Motors: (Einzelradsteuerung, Motordrehmoment proportional zur Radaufstandskraft, neue Radreifen, Getriebewirkungsgrad $\eta_G = 0,98$)

Höchste Belastung am Radsatz 4: $F_{max} = 1/4 \cdot F_H \cdot (F_{Z4}/F_{ref}) = 85,12 \text{ kN}$

$$\Rightarrow \underline{M_{dMotor} = 1/i_1/\eta_G \cdot F_{max} \cdot D_{rad}/2 = 13,71 \text{ kNm}}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

9.2.3 Elektromagnetische Grobauslegung der Asynchrontraktionsmaschinen (1/3) [81]

Maximales Drehmoment	$M_{max} = 13,7 \text{ kNm}$	Raddurchmesser	$D_{Rad} = 1250 \text{ mm}$
max. Radreifenabnutzung	$\delta_{Rad} = 40 \text{ mm}$	max. Geschwindigkeit	$v_{max} = 230 \text{ km/h}$
Motornennleistung	$P_N = 6400 \text{ kW}$	max. Motordrehzahl	$n_{max} = 4000 \text{ min}^{-1}$
Getriebeübersetzung:	$i = 3,96$	U-WR Zwischenkreisspannung	$U_d = 2800 \text{ V}$
Rotorkurzschlusszeitkonstante	$L_\sigma/R_r = T_\sigma = 50 \text{ ms}$	Strefaktor	$\sigma = 0,1$

* Elektrische Drehkreisfrequenz ω_L am Leistungspunkt $v_L = 76,8 \text{ km/h}$ mit einem 4-poligen Motor:

$$\underline{\omega_L} = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot v_L / (\pi \cdot D_{Rad}) \cdot i = \underline{270 \text{ s}^{-1}}$$

* Streuinduktivität L_σ mit Forderung, dass der Motor bei höchster Fahrgeschwindigkeit und ganz abgenutzten Radreifen ein der um 5% erhöhte Nennleistung entsprechendes Drehmoment gerade mit seinem Kippmoment erbringt.

$$D = D_{Rad} - 2 \cdot \delta_{Rad} = 1170 \text{ mm}$$

$$P_{max} = 1/4 \cdot 1,05 \cdot P_N = 1680 \text{ kW pro Motor}$$

$$M_d = 3 \cdot p \cdot (U_S/\omega_S)^2 \cdot (\omega_r/R_r) / (1 + \omega_r^2 \cdot (L_\sigma/R_r)^2)$$

Rotorkreisfrequenz am Kippunkt mit konstanter Spannung: $\omega_r = \omega_{rK} = R_r/L_\sigma = 1/T_\sigma = 20 \text{ s}^{-1}$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Elektromagnetische Grobauslegung der Asynchrontraktionsmaschinen (2/3) [81]

$$\Rightarrow L_\sigma = 3/2 \cdot p \cdot (U_S / \omega_{SK})^2 \cdot (1/M_{dK})$$

mit $U_S = U_{S\lambda} = \sqrt{2/\pi} \cdot U_d = 1260 \text{ V}$

$$M_{dK} = M_{dRadmax} / i = (F_{Rad} / i) \cdot (D/2) = (P_{max} / v_{max} \cdot i) \cdot (D/2) = 4061 \text{ Nm}$$

$$\omega_{SK} = \omega_{max} + \omega_{rK} = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot v_{max} / (\pi \cdot D) \cdot i + 20 = 827,3 \text{ s}^{-1}$$

$$\Rightarrow \underline{L_\sigma = 1,63 \text{ mH}}$$

* Magnetisierungsinduktivität L_μ :

$$\sigma = L_\sigma / (L_\mu + L_\sigma) \Rightarrow \underline{L_\mu = L_\sigma \cdot (1/\sigma - 1) = L_\sigma \cdot 9 = 14,7 \text{ mH}}$$

* Im Anfahrbereich sollen die Motoren mit kleinstem Ständerstrom betrieben werden, Rotorkreisfrequenz ?

$$M_{dmax} = 3 \cdot p \cdot (U_S / \omega_S)^2 \cdot (\omega_r / R_r) / (1 + \omega_r^2 \cdot (L_\sigma / R_r)^2) \quad \text{mit} \quad R_r / L_\sigma = \omega_{rK} \quad \text{und} \quad U_S / \omega_S = \Psi_\mu$$

$$\Rightarrow M_{dmax} = 3 \cdot p \cdot (\Psi_\mu^2 / L_\sigma) \cdot (\omega_r / \omega_{rK}) / (1 + (\omega_r / \omega_{rK})^2) \quad \text{mit} \quad \Psi_\mu = L_\mu \cdot I_\mu = L_\mu \cdot I_S \cdot \sqrt{[(1 + (\omega_r / \omega_{rK})^2) / (1 + (\omega_r / (\sigma \cdot \omega_{rK}))^2)]}$$

$$\Rightarrow M_{dmax} = 3 \cdot p \cdot (L_\mu^2 / L_\sigma) \cdot (\omega_r / \omega_{rK}) / (1 + (\omega_r / (\sigma \cdot \omega_{rK}))^2) \cdot P_S \Rightarrow P_S = M_{dmax} / (3 \cdot p) \cdot L_\sigma / L_\mu^2 \cdot (1 + (\omega_r / (\sigma \cdot \omega_{rK}))^2) / (\omega_r / \omega_{rK})$$

$$I_S \text{ wird minimal, wenn } d/d\omega_r [1/(\omega_{rK} \cdot \sigma^2) \cdot (\omega_{rK}^2 \cdot \sigma^2 + \omega_r^2) / \omega_r] = 0 \Rightarrow \underline{\omega_{r4} = \sigma \cdot \omega_{rK} = 2 \text{ s}^{-1}}$$

Ständerstrom: $I_S = 587 \text{ A}$

Magnetisierungsstrom: $I_\mu = 417,3 \text{ A}$

Ständerfluss: $\Psi_\mu = 6,13 \text{ Vs}$

Einzustellende Spannung für ω_r : $U_{S4} = \omega_r \cdot \Psi_\mu = 12,26 \text{ V}$

$$|I_r| = U_{S4} / (\omega_r \cdot L_\sigma) = 3761 \text{ A}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Elektromagnetische Grobauslegung der Asynchrontraktionsmaschinen (3/3) [81]

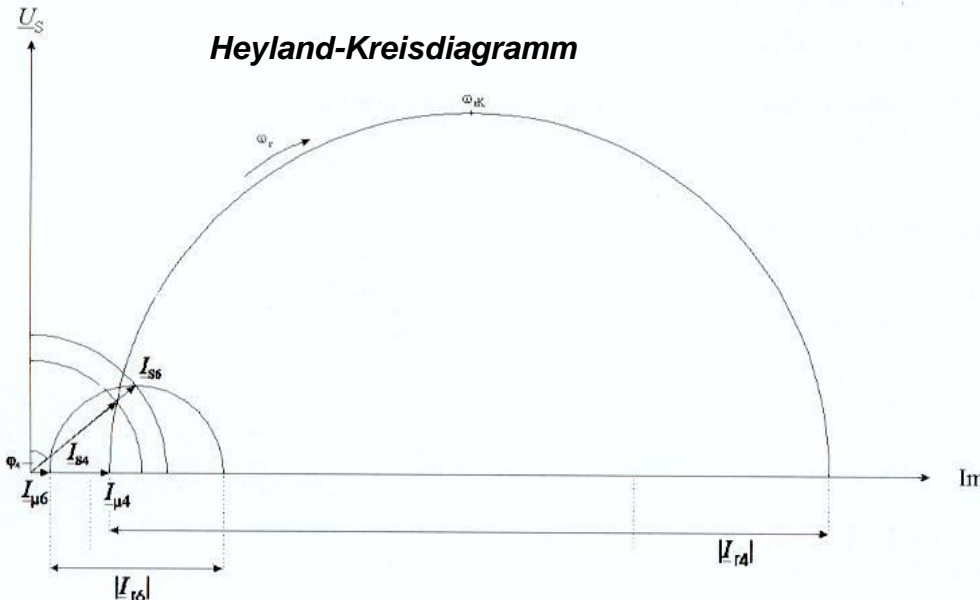


Bild 9.2 Kreisdiagramm [81]

Aus der Zeichnung: $\varphi = 52^\circ$

\Rightarrow Verschiebungsfaktor $\cos \varphi = 0,61$

* Den für den Anfahrpunkt ermittelte Fluss kann am Nenn- = Typenpunkt wegen der erhöhten Eisenverluste nicht zugelassenen werden.

Bestimmung: Typen- = Leistungspunkt

Näherung: $\omega_r \approx \omega_{r4} = 2 \text{ s}^{-1}$

$$\underline{\Psi}_{\mu 5} = U_S / \omega_S = U_S / (\omega_L + \omega_{r4}) = \underline{4,63 \text{ Vs}}$$

$$I_{\mu 5} = \Psi_{\mu 5} / L_\mu = 315,1 \text{ A}$$

$$|I_{r5}| = U_S / ((\omega_L + \omega_{r4}) \cdot L_\sigma) = 2842 \text{ A}$$

$$M_d = M_{dmax} = 3 \cdot p \cdot L_\mu^2 / L_\sigma \cdot (\omega_{r5} \cdot \omega_{rK}) / (\omega_{rK}^2 + \omega_{r5}^2) \cdot I_\mu, \quad \omega_{r5} \ll \omega_{rK} \Rightarrow \underline{\omega_{r5} = 3,5 \text{ s}^{-1}}$$

$$\underline{I_{S5}} = I_{\mu 5} \cdot \sqrt{[(1 + (\omega_{r5} / (\omega_{rK} \cdot \sigma))^2) / (1 + (\omega_{r5} / \omega_{rK})^2)]} = \underline{625,6 \text{ A}}$$

Aus der Zeichnung: $\varphi = 38^\circ \Rightarrow \underline{\cos \varphi = 0,79}$

* Bei maximaler Frequenz und Leistung: $\underline{\Psi}_{\mu 6} = U_S / \omega_{SK2} = \underline{1,48 \text{ Vs}}$ $I_\mu = \Psi_{\mu 6} / L_\mu = 101,2 \text{ A}$

$$\underline{I_{S6}} = I_{\mu 6} \cdot \sqrt{[(1 + (\omega_{r6} / (\omega_{rK} \cdot \sigma))^2) / (1 + (\omega_{r6} / \omega_{rK})^2)]} = \underline{718 \text{ A}} \quad |I_{r6}| = U_S / (\omega_{SK2} \cdot L_\sigma) = 912,3 \text{ A}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

9.2.4 Grobauslegung des Vierquadrantenstellers (1/4) [81]

Die Universallokomotive ($P_N = 6400 \text{ kW}$) mit Asynchron-Kurzschlussläufer-Fahrmotoren soll mit je 2 Vierquadrantstellern pro Drehgestell aus dem 16,7 Hz-15 KV-Bahnnetz gespeist werden.

* Eingangsleistung eines Vierquadrantenstellers (4q-S) bei 5 % Drehgestellmehrbelastung:

$$\eta_{SK} = \eta_{4q-S} = 1 \quad ; \quad \eta_{Getriebe} = 0,98$$

$$\eta_{Motor} = 0,95 \quad ; \quad \eta_{WR} = 0,985$$

* 4q-S Daten: $U_{dN} = 2800 \text{ V}$ $f_z = 250 \text{ Hz}$ $T_{min} = 200 \mu\text{s}$

Maximale Stellerspannung: $\underline{U_{Smax}} = (1 - 2 \cdot f_z \cdot T_{min}) \cdot U_{dN} / \sqrt{2} = \underline{1782 \text{ V}}$

* Mit $u_{xN} = 0,333$ und $u_{rN} = 0,05$ ist die sekundäre Transformator-Leerlaufspannung U_F so zu bemessen, dass bei 15 % Netzüberspannung und $\cos \varphi_1 = +1$ die max. Stellerspannung nicht überschritten wird.

$$U_F = (1 + \sigma) \cdot U_{FN} \quad \text{mit} \quad \sigma = 0,15$$

$$u_{xN} = I_{FN} \cdot X_F / U_{FN} \quad \text{und} \quad U_X = u_x \cdot U_{FN} = I_{FN} \cdot X_F / ((1 + \sigma) \cdot U_{FN}) \cdot U_{FN} \Rightarrow \underline{U_X = u_{xN} \cdot U_{FN} / (1 + \sigma)}$$

$$u_{rN} = I_{FN} \cdot R_F / U_{FN} \quad \text{und} \quad U_R = u_r \cdot U_{FN} = I_{FN} \cdot R_F / ((1 + \sigma) \cdot U_{FN}) \cdot U_{FN} \Rightarrow \underline{U_R = u_{rN} \cdot U_{FN} / (1 + \sigma)}$$

$$U_S^2 = (U_F - U_R)^2 + U_X^2 = [(1 + \sigma) \cdot U_{FN} - u_{rN} \cdot U_{FN} / (1 + \sigma)]^2 + [u_{xN} \cdot U_{FN} / (1 + \sigma)]^2$$

$$\Rightarrow \underline{U_{FN} = U_S / [(1 + \sigma) \cdot \sqrt{[(1 - u_{rN} / (1 + \sigma))^2 + (u_{xN} / (1 + \sigma))^2}]}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Grobauslegung des Vierquadrantenstellers (2/4) [81]

* Mit Netzennennspannung und $\cos \varphi = 1$,

$$\text{Stellereingangsstrom: } P_F = U_P I_F \cos \varphi = U_P I_F$$

$$\text{und } P_F = P_{E4q-S} / \eta_{\text{Trafo}} = P_{E4q-S} / (1 - 0,05) \Rightarrow \underline{I_F = 1238 \text{ A}}$$

$$\text{Trafo-Längswiderstand: } u_{rN} = I_P R_P / U_{FN} \Rightarrow \underline{R_F = u_{rN} \cdot U_{FN} / I_F = 62,9 \text{ m}\Omega}$$

$$\text{Trafo-Streuinduktivität: } u_{xN} = I_P X_P / U_{FN} \Rightarrow X_F = u_{xN} \cdot U_{FN} / I_F = 0,42 \Omega \Rightarrow \underline{L_F = X_P / (2 \cdot \pi \cdot f) = 4 \text{ mH}}$$

$$U_S^2 = U_{FN}^2 \cdot [(1 - u_{rN})^2 + u_{xN}^2] \Rightarrow \underline{U_S = 1568 \text{ V}}$$

$$\underline{\psi_1 = \arcsin (U_{FN} \cdot u_{xN} / U_S) = -19,3^\circ}$$

$$\text{* Ausgangs-Gleichstrom: } \bar{i}_d = P_{E4q-S} / U_d = 654,3 \text{ A}$$

$$\text{Saugkreisstrom: } I_{d2} = 1/2 \cdot k^\wedge \cdot I_F = 1/2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_S / U_d) \cdot I_F = 490 \text{ A} \quad \text{mit } k^\wedge = \text{Aussteuerung des 4q-S}$$

Wahl von C_2 und L_2 , wenn die Amplitude der Wechselkomponente der Saugkreiskondensatorspannung 800 V nicht überschreiten soll:

$$\hat{u}_{C2} = \hat{i}_{d2} / (\omega_E \cdot C_2) \quad \text{mit } \omega_E = 2 \cdot \omega_N \text{ Saugkreis für die Frequenz der Pendelleistung}$$

$$\Rightarrow \underline{C_2 = i_{d2} / (u_{C2} \cdot 2 \cdot \omega_N) = \sqrt{2} \cdot I_{d2} / (u_{C2} \cdot 4 \cdot \pi \cdot f) = 4,13 \text{ mF}}$$

$$\text{Reihenschaltung aus } L_2, C_2: \quad \omega_E^2 = 1 / (L_2 \cdot C_2) \quad \Rightarrow \quad \underline{L_2 = 5,5 \text{ mH}}$$



9 Auslegung von Antriebssystemen

Grobauslegung des Vierquadrantenstellers (3/4) [81]

* Effektivwert des dem Stellereingangsstrom
überlagerten Wechselanteils:

$$\hat{i} = 1/L_F \int (U_d/2, t, 0, 1/8 \cdot f_z) = U_d / (L_F \cdot 2 \cdot 8 \cdot f_z) = 175 \text{ A}$$

$$P = 4/T \cdot \int ([1/2 \cdot \Delta i \cdot t / (T/4)], t, 0, T/4)$$

$$\Rightarrow \underline{I} = \Delta i / (\sqrt{3 \cdot 2}) = \hat{i} / \sqrt{3} = \underline{100,7 \text{ A}}$$

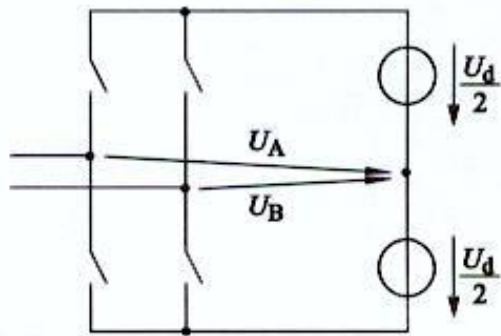
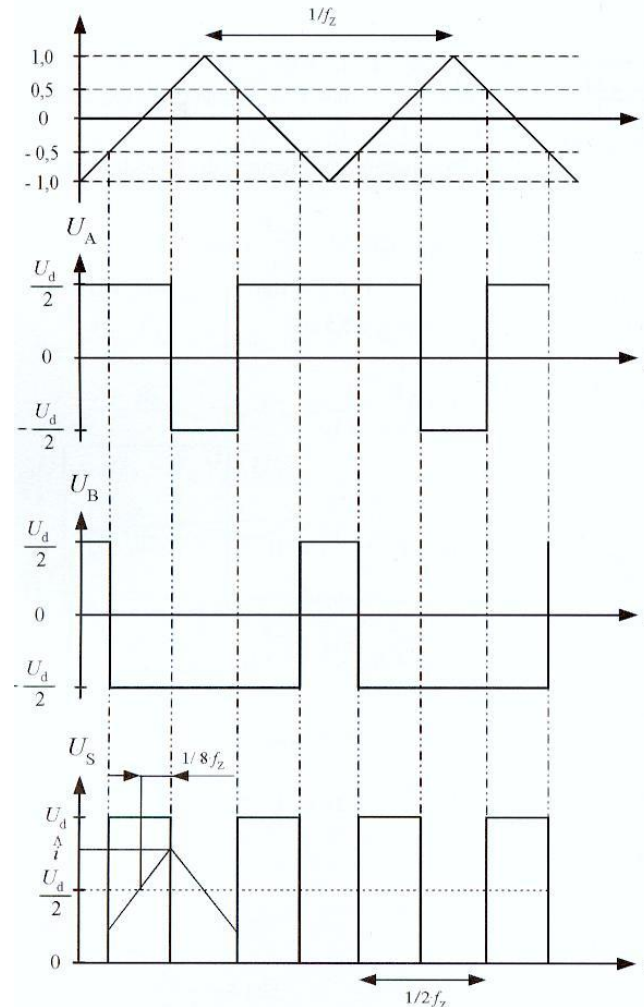


Bild 9.3 Brückenschaltung [81]



9 Auslegung von Antriebssystemen

Grobauslegung des Vierquadrantenstellers (4/4) [81]

* Netz-Bremsbetrieb bei Netznennspannung, wenn die Bremsleistung am Rad gleich der negativen Fahrleistung gefordert ist. Leistungsfluss vom Rad zum 4q-S:

$$P_{4q-S} = -1,05 \cdot P_N / 4 \cdot \eta_{\text{Getriebe}} \cdot \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{WR} = -1541 \text{ kW}$$

$$U_{FN} \cdot I_F \cdot \cos \varphi = P_{4q-S} + P_F R_F \Rightarrow \underline{I_F = 952,2 \text{ A}}$$

$$\underline{U_S} = \sqrt{[(U_{FN} + I_F R_F)^2 + (I_F X_F)^2]} = \underline{1666 \text{ V}}$$

$$\underline{\psi_1} = \arcsin(I_F X_F / U_S) = \underline{13,9^\circ}$$

$$\underline{\hat{I}_d} = P_{4q-S} / U_d = \underline{-550 \text{ A}}$$

$$\underline{I_{d2}} = 1/2 \cdot \hat{k} \cdot I_F = 1/2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_S / U_d) \cdot I_F = \underline{400,75 \text{ A}}$$

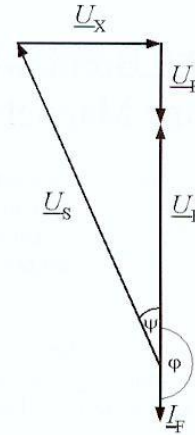


Bild 9.4
Zeigerdiagramm [81]

* Im Bremsbetrieb ist bei maximaler Fahrdrahtspannung ($1,15 \cdot U_{FN}$) ein Verschiebungswinkel von 164° erforderlich, um die maximale Stellerspannung einzuhalten („Induktives Bremsen“)

$$\underline{I_F} = U_F / (2 \cdot R_F) \cdot \cos \varphi \pm \sqrt{[(U_F / (2 \cdot R_F) \cdot \cos \varphi)^2 - P_{4q-S} / R_F]} = \underline{867,3 \text{ A}}$$

$$\underline{\psi_1} = \arcsin[(-R_F I_F \sin \varphi + X_F I_F \cos \varphi) / U_S] = \underline{11,8^\circ}$$

$$\underline{\hat{I}_d} = P_{4q-S} / U_d = \underline{-550 \text{ A}}$$

$$\underline{I_{d2}} = 1/2 \cdot \hat{k} \cdot I_F = 1/2 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_S / U_d) \cdot I_F = \underline{390 \text{ A}}$$

$$\underline{U_S} = \sqrt{[(U_F - X_F I_F \sin \varphi - I_F R_F \cos \varphi)^2 + (I_F X_F \cos \varphi - I_F R_F \sin \varphi)^2]} = \underline{1782 \text{ V}}$$

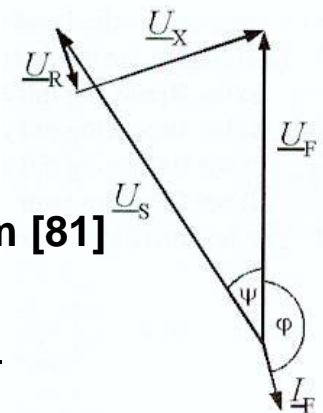


Bild 9.
Zeigerdiagramm [81]

9 Auslegung von Antriebssystemen

9.3 Mechanische Probleme

Lagerschäden

Bruch von Zahnrädern

Bruch von Kurzschlusskäfigsystemen

Eindringen von Wasser oder Getriebeöl in Fahrmotoren

Isolationsschäden durch Schwingungen und mechanische Beschädigungen

Bruch diverser Anbauteile durch Schwingungen im Fahrbetrieb

Bruch von Radreifen beim ICE 1 (Eschede)



9 Auslegung von Antriebssystemen

Stabbrüche bei Kurzschlussläufern von Asynchronmotoren



Bild 9.6 KS- Stäbe Bruch und Risse [3]



Bild 9.7 abgetrennter KS- Ring [3]

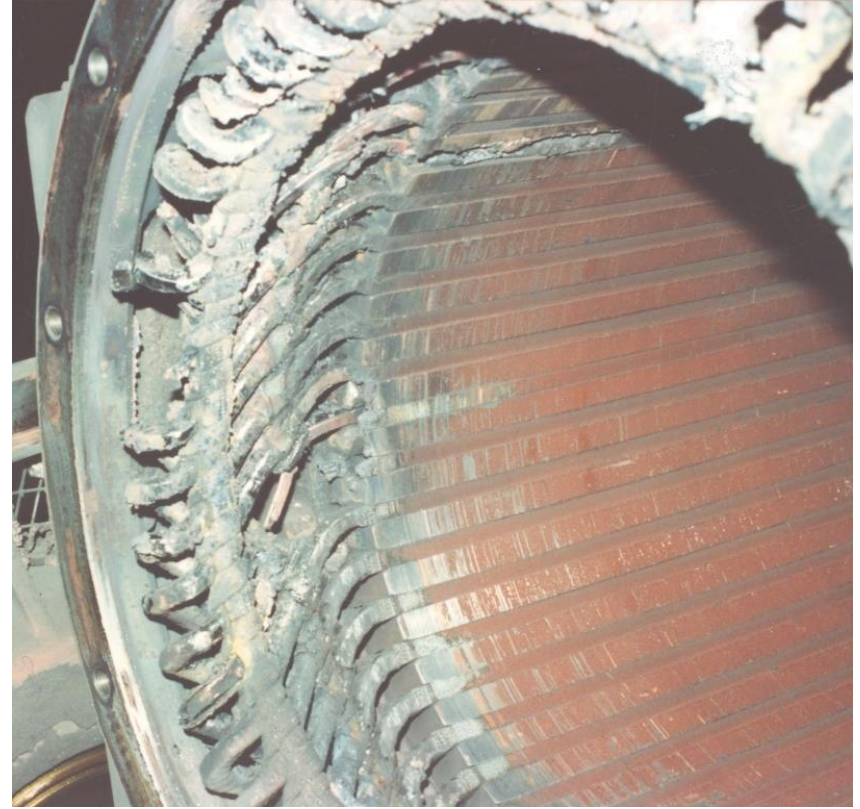


Bild 9.8 Statorwicklung beschädigt Totalschaden [3]

9 Auslegung von Antriebssystemen

Risse in Aluminiumguss - Kurzschlussläufer - Wicklungen

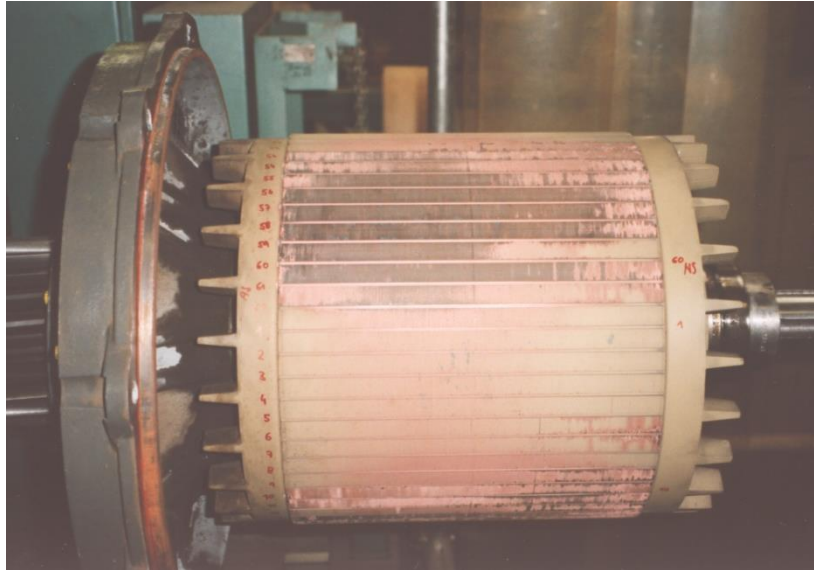


Bild 9.9 Rotor mit Aluguss-Käfig und Lüfterflügel an beiden KS-Ringen [3]



Risse

Bild 9.10+11 Risse bei KS-Stäben bei Übergang zum KS-Ring [3]

9 Auslegung von Antriebssystemen

Schwingungsbrüche von Lufteintrittsgitter

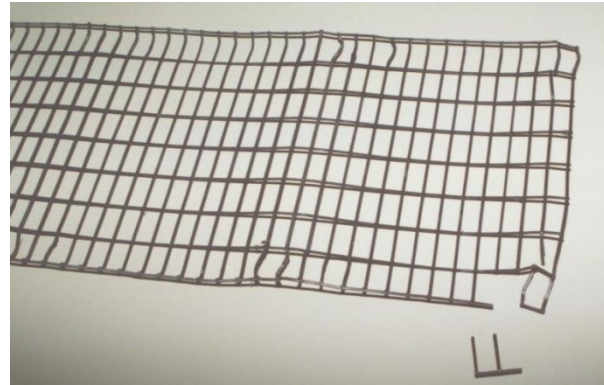


Bild 9.13 Lüftungsgitter mit abgebrochenen Gitterdrähten an den Verschraubungsstellen [3]

Folgeschaden: Wicklungsschluss - Statortotalschaden

Bild 9.12 Lüftungsgitter am BS-Lagerschild mit abgebrochenen Gitterdrähten [3]



Bild 9.14+15 Nachbildung der Schadensursache am Schwingtisch [3]



9 Auslegung von Antriebssystemen

Bruch des Radreifens beim ICE 1 (Eschede)



ICE der 1. Generation

Zugnummer: 884

„Wilhelm Conrad Röntgen“

Baureihe: 401

Strecke: München - Hamburg

14 Waggons

Bild 9.16 Unglücksort aus der Vogelperspektive [67]

3. Juni 1998, um 10:59 Uhr -

Ein ICE 1 zerschellt bei 200 km/h an einer Brücke im niedersächsischen Eschede

Bilanz: 100 Tote und 88 zum Teil schwer Verletzte, Schadenssumme: ca. 150 Mio. €



9 Auslegung von Antriebssystemen

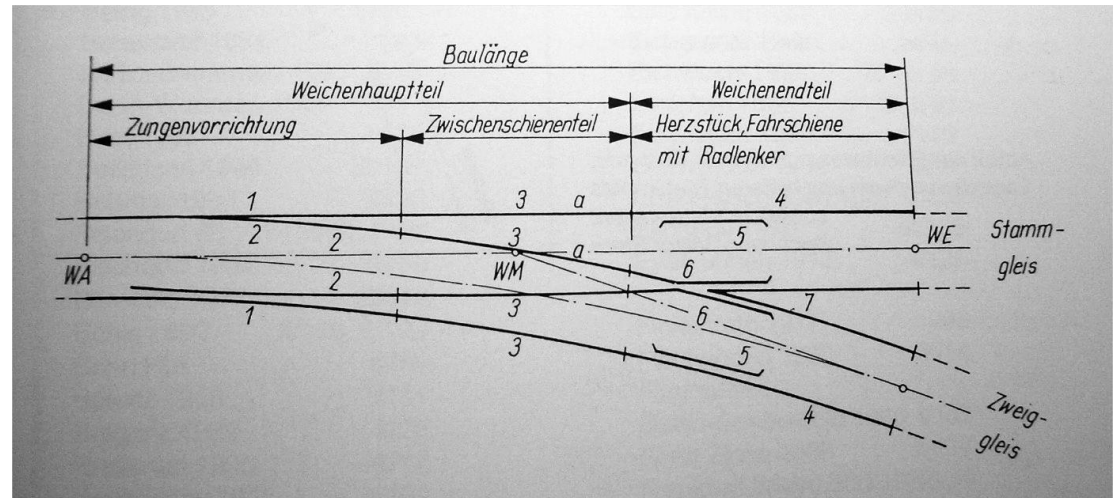


Bild 9.17 Unfallskizze [67]

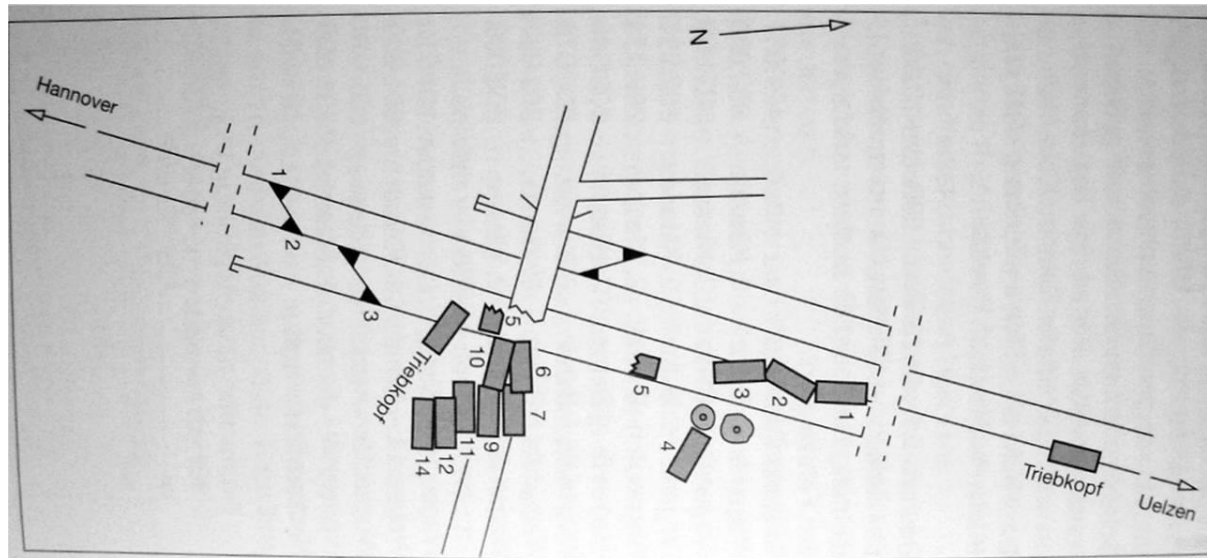


Bild 9.18 Weiche auf der Strecke [67]

- 1 Backenschiene
- 2 Weichenzunge
- 3 Zwischenschiene
- 4 Fahrschiene
- 5 Radlenker
- 6 Flügelschiene
- 7 Herzstück
- a äußerer Schienenstrang
- WA Weichenanfang
- WE Weichenende

9 Auslegung von Antriebssystemen

Unfallablauf

1. Erster Wagen am hinteren Drehgestell (3. Radsatz) ein defekter Radreifen löst sich von Radscheibe und verhakt sich in seinem Drehgestell.
2. nach ca. 5,5 km: defekter Radreifen verhakt sich im Radlenker der Weiche 2.
3. Teile des Radlenkers werden abgesprengt und dringen in den Wagen ein.
4. Durch Wucht des Aufpralls entgleist der defekte Radsatz nach rechts.
5. Linkes Rad des Radsatzes stößt auf die abliegende Zunge der Weiche 3 und stellt diese auf „rechts“.
6. Der 2. Wagen entgleist, bleibt aber mit 1. und 3. verbunden.
7. Hinteres Drehgestell des 3. Wagen nach rechts abgelenkt und schlägt mit seinem hinteren Ende einen Stützpfeiler der Straßenbrücke weg.
8. Durch Aufprall Trennung des Zuges zwischen Triebkopf vorne + 1 und 3 + 4 und 4 + 5.
9. Dadurch Einleitung der Zwangsbremmung.
10. 4. Wagen kommt noch unter Brücke durch.
11. Wagen 5 wird von der herabstürzenden Brücke zerteilt.
12. Hintere Hälfte von 5 und komplett 6 werden unter der Fahrbahn begraben.
13. Die restlichen Wagen klappen zusammen wie ein Zollstock.
14. Hinterer Triebkopf ist ebenfalls getrennt und gebremst, rast aber noch in den Trümmerhaufen.



9 Auslegung von Antriebssystemen

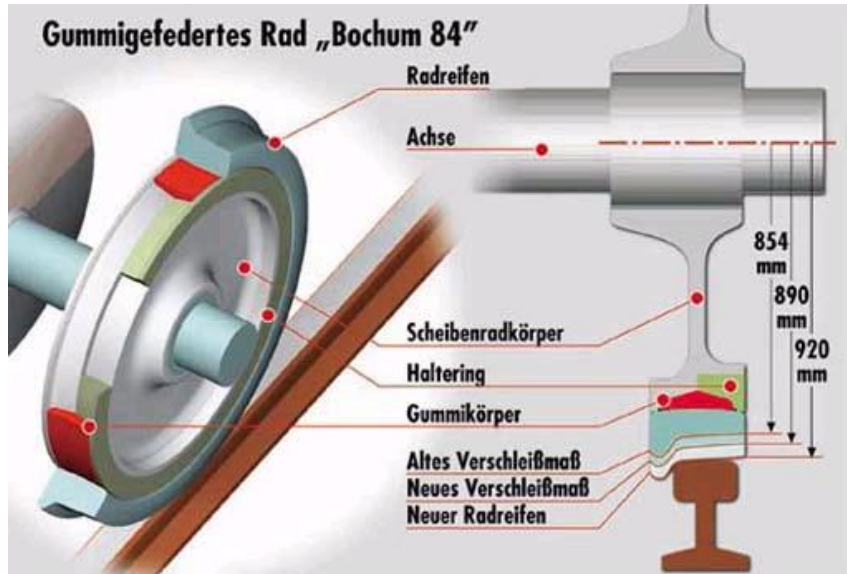


Bild 9.19 Gummigefedertes Rad [67]

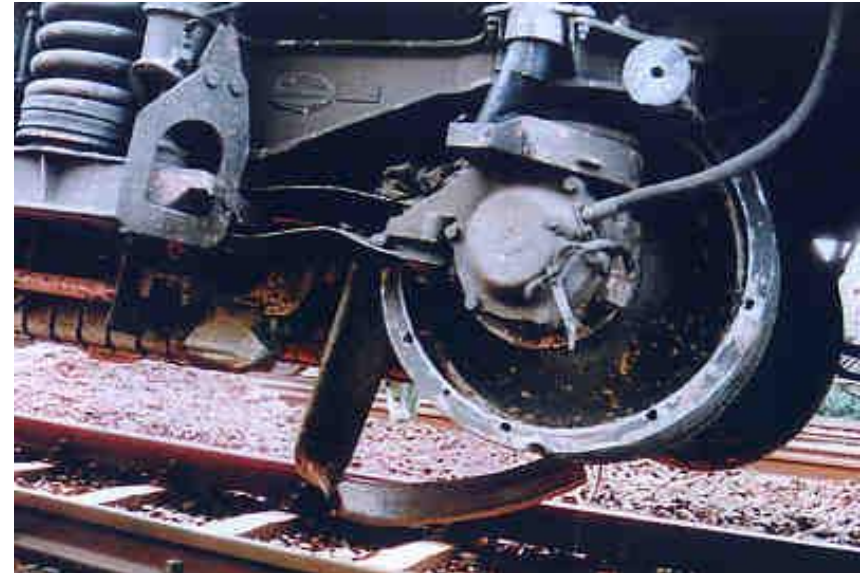


Bild 9.20 abgelöster Radreifen [67]

1. Aus Kostengründen wurde eine Stahlfederung (ICE 1) statt einer Luftfederung (ICE 2, 3) eingesetzt.
2. Seit Anfang April war das defekte Rad vom Zugpersonal als auffällig gemeldet worden.
3. Der Ultraschallteil der ULM-Radsatz-Diagnose war 1994 eingestellt worden.
4. Der Durchmesser und die Rundlaufabweichung erreichten unzulässige Werte und wurden trotzdem nicht ausgetauscht.
5. Die konventionellen Weichen belasten die Radreifen sehr stark.
6. Der defekte Wagen lief am Zuganfang
7. Der Zugbegleiter hatte nicht die Notbremse gezogen.
8. Es gab keine Sensoren die Radbrüche erkennen können.

9 Auslegung von Antriebssystemen

9.4 Thermische Probleme

Lagerschäden wegen zu hoher Fett- bzw. Lagertemperatur

Statorwicklungstemperatur

Rotortemperatur

Zusätzliche Verluste in ferromagnetischen Durchführungsplatten



9 Auslegung von Antriebssystemen

Statorwicklungstemperatur



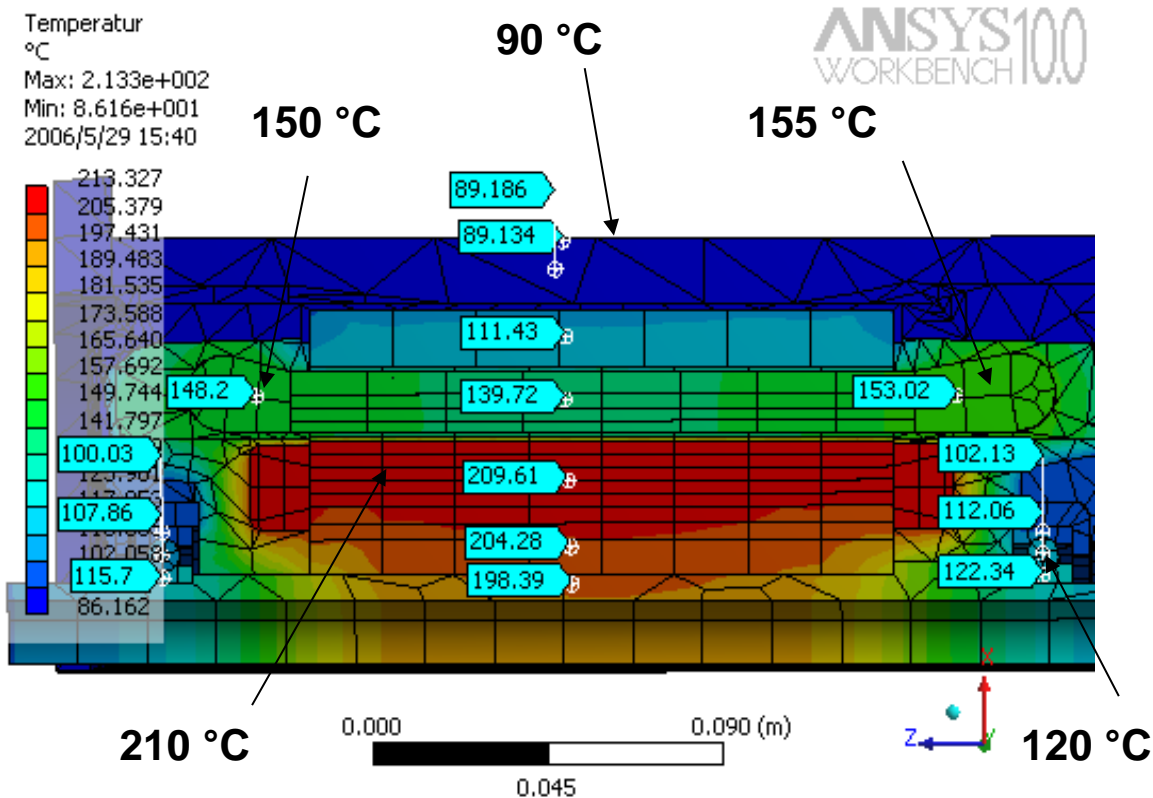
**Bild 9.21 Austritt des Harzes im Bereich der Statornut
Grund: Zu hohe Rotortemperatur
[3]**



Bild 9.22 Isolationsharz von der Statorwicklung als braune zähe Masse aus der Nut ausgetreten [3]

9 Auslegung von Antriebssystemen

Rotortemperaturen



Gefahr der zu hohen Rotortemperatur:

- Durch hohe Temperatur steigt Widerstand des Rotors
- Dadurch wird Schlupf s der ASM größer
- Durch größeren Schlupf steigt die Verlustleistung im Rotor
- Dadurch noch höhere Temperatur im Rotor (thermische Mitkopplung)

Abhilfe: Keilstab (innen breiter, außen schmaler)

geringeres A.S im Rotor
forcierte Rotorkühlung

Bild 9.23 Temperaturen im Rotor bei einer flüssigkeitsgekühlten ASM mit hoher Ausnützung [58]



9 Auslegung von Antriebssystemen

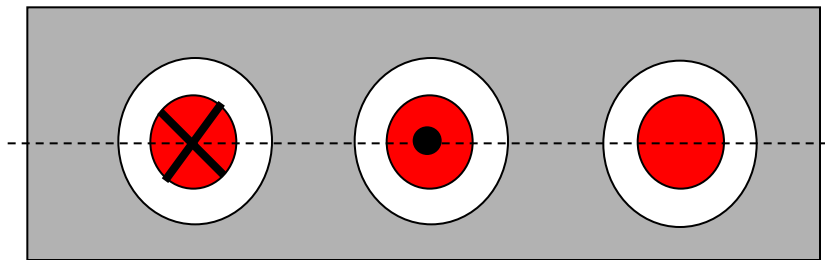
Durchführungsplatte aus ferromagnetischen Material

Grund : Magnetfelder der Anschlussleitungen erzeugen Wirbelströme in der ferromagnetischen Durchführungsplatten

Abhängigkeit: Stromstärke, Frequenz, geometrische Anordnung

Abhilfe: Schlitzten der Platte (Durchbrechung der Wirbelströme)

Verwendung von antimagnetischen Material (z. B. : Stahl Werkst.Nr. 1.4571)



Abmessungen:

Länge: 310 mm

Breite: 100 mm

Stärke : 6 mm

Durchmesser: 60 mm

Bild 9.24 Versuch mit Durchführungsplatte,

Strom: 500 A; Frequenz: 100 Hz;

Zeit: 32 min; Temperatur: 100°C

9 Auslegung von Antriebssystemen

9.5 Akustische Probleme

Magnetisches Geräusch Traktionsmotor - Anregung durch Kraftwellen im Luftspalt

Daten des Traktionsmotors:

Leistung P:	400 kW	Statornutenzahl:	54	Motormasse:	1995 kg
max. Drehzahl n:	2670 min ⁻¹	Rotornutenzahl:	62	Nennspannung:	1640 V
max. Drehmoment:	6770 Nm	Polzahl:	4	Nenn Drehzahl:	564 min ⁻¹

Bestimmung der Tongeraden:

$$f_t = f_1 \cdot [g \cdot N_2 / p \cdot (1-s) + 2] = f_1 \cdot [62/3 \cdot (1-0) - 2] = f_1 \cdot 18,66$$

f_t	Tonfrequenz des Körperschalls/Luftschalls
f_1	Speisefrequenz (Grundschiwingung) der Ständerwicklung
N_2	Nutenzahl Rotor
s	Schlupf (Leerlauf $s = 0$)
g	Ordnungszahl

Bestimmung der Gehäuseeigenfrequenz

$f_{res} = 507 \text{ Hz}$ Messung mit Schwingungsaufnehmer



9 Auslegung von Antriebssystemen

Berechnung der kritischen Speisefrequenz für Gehäuseresonanzanregung:

$$f_1 = f_{\text{krit}} = f_{\text{res}}/18,66 = 507 / 18,66 = 27,2 \text{ Hz}$$

Entstehung einer stehenden Verformungskraftwelle

$$|N_1 - N_2| = 2p \pm r \qquad |54 - 62| = 6+2 \qquad r = 2 \qquad 4 \text{ Knotenpunkte}$$

exakte Ausbildung dieser Verformungskraftwelle

durch symmetrische Gehäuseform mit

4 Knotenpunkten (massive Zuggleisten der Aufhängung)

Schalldruckpegel bei kritischer Frequenz: $L_m = 100\text{dB(A)}$ 1 m Abstand

Vermeidung der Schallemission: Rotornutenzahl $N_2 = 66$

$$f_t = r_1 \cdot 20 \qquad \text{kritische Speisefrequenz} = 25,35 \text{ Hz} \qquad r = 6 \qquad 12 \text{ Knotenpunkte}$$

Verformungswelle mit 12 Knotenpunkten kann sich bei bestehenden Gehäuse nicht ausbilden, somit auch keine kritische Frequenz möglich

Schalldruckpegel im Frequenzbereich 10 - 60 Hz : $L_m = 65 -70 \text{ dB(A)}$ 1 m Abstand



9 Auslegung von Antriebssystemen

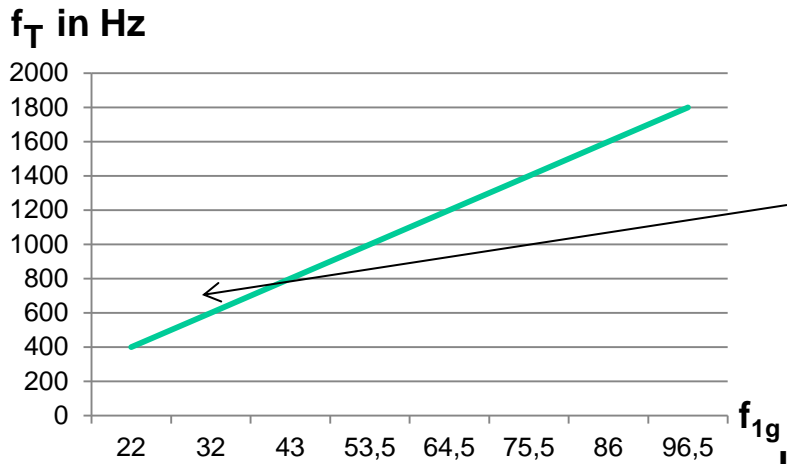
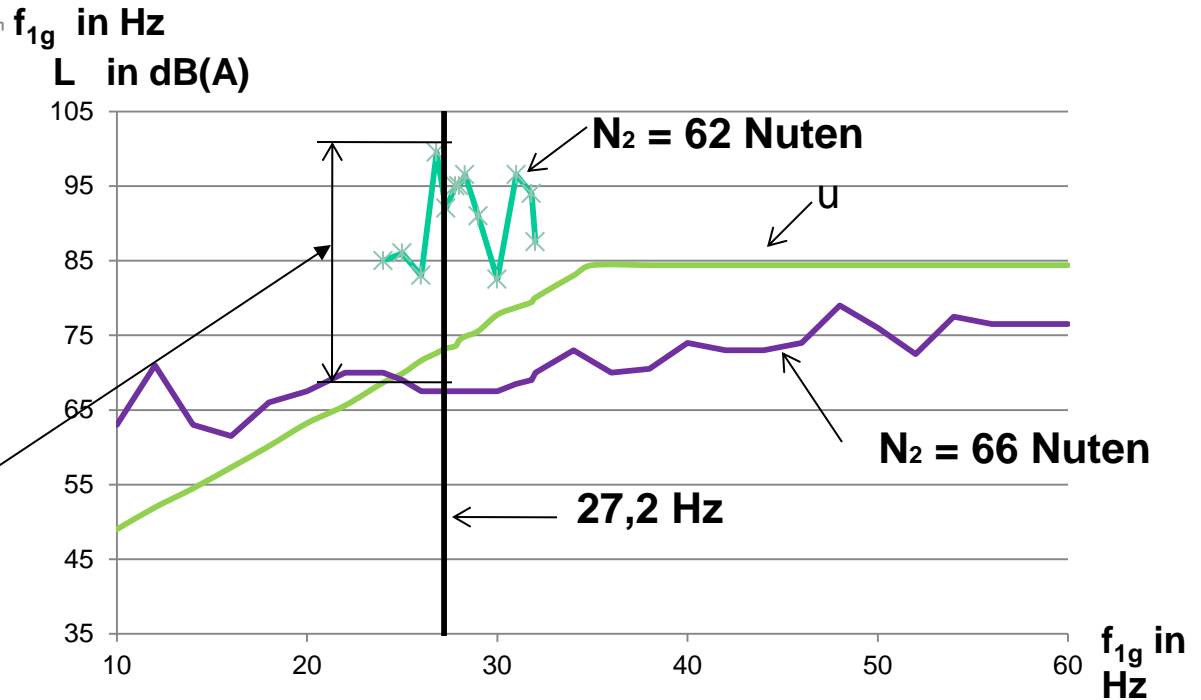


Bild 9.25 Funktion der Tongeraden

f_{res} : 507 Hz bei f_{1g} : 27,2 Hz

Bild 9.26 Messung des Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Statorgrundfrequenz

Reduzierung um 31 dB(A) beim Resonanzpunkt



9 Auslegung von Antriebssystemen



Bild 9.27 Versuch einer Schalldämmung mit Glaswolle [3]

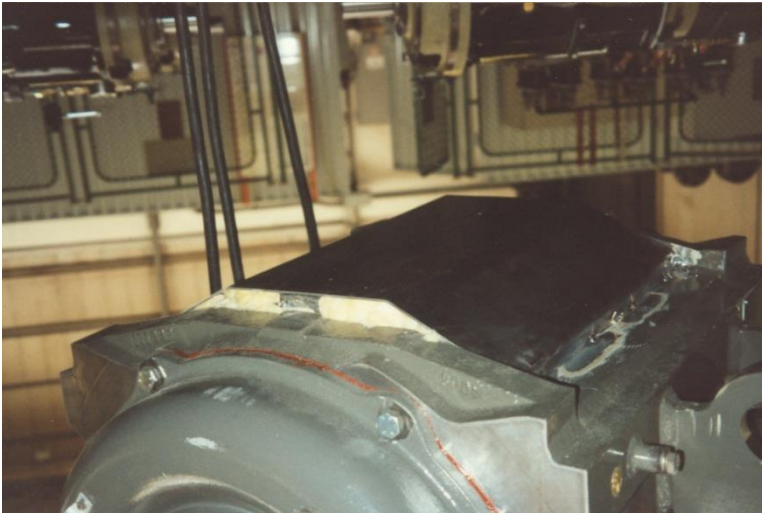


Bild 9.28 Versuch einer Schalldämmung mit Dämmmaterial und Zusatzmantel [3]

10 Beispiele ausgeführter Triebfahrzeuge

Teil 2A

Lokomotiven, Hochgeschwindigkeitszüge

Teil 2B

Dieselelektrische Fahrzeuge, S-, U- und Straßenbahnen, Sonderfahrzeuge



11 Literaturverzeichnis

- [1] ABB diverse Unterlagen
- [2] Adler, G. u. a. Lexikon der Eisenbahn, 8. Auflage, transpress Stuttgart, 1990
- [3] Adtranz diverse Unterlagen
- [4] Baur, K.G. Baureihe 101, 1. Auflage, GeraMond Verlag München, 1999
- [5] Baur, K.G. Taurus – Lokomotiven für Europa, EK Verlag, 2003
- [6] Bätzold/Rampp et al. Elektrische Lokomotiven deutscher Eisenbahnen, alba, Düsseldorf, 1993
- [7] Baier-Fuchs, A. Jahrbuch des Eisenbahnwesens, Hestra-Verlag, 1993
- [8] Beier, R. Kleine Typenkunde österreichischer Triebfahrzeuge, transpress, Stuttgart, 1996
- [9] Bendel, H. Die elektr. Lokomotive, transpress Berlin, 1994
- [10] Berndt, T. Eisenbahngüterverkehr, Teubner Verlag, 2001
- [11] Bombardier Referenzliste und Datenblätter Stadtverkehr, 2004
- [12] Bombardier Referenzliste und Datenblätter Lokomotiven 2004
- [13] Bombardier diverse Unterlagen
- [14] Braun, A. DB- Fahrzeuge, Band 2, GeraMond, München, 1998
- [15] Deutsche Bahn AG diverse Unterlagen
- [16] Dreher, H. Taschenbuch Triebfahrzeuge der DB, Franckh-Kosmos, Stuttgart, 1990
- [17] Doleschal/Gerl et al. Triebfahrzeuge österreichischer Eisenbahnen, Diesel-Lok, alba, Düsseldorf, 1993
- [18] Eckert/Berndt 1000 Lokomotiven, Naumann & Göbel, Köln
- [19] Eckert, K. Lokomotiven, Dumont monte Verlag, 2003



11 Literaturverzeichnis

- [20] Eckert, K. Lokomotiven, Dumont monte Verlag, 2003
- [21] Feldmann, T. Rhein-Ruhrgebiet Lokomotiven und Landschaften, Heel Verlag, 1994
- [22] Fiedler, J. Grundlagen der Bahntechnik, Werner- Verlag, 3. Auflage, 1991
- [23] Filipovic, Z. Elektrische Bahnen, 2.Auflage, Springer-Verlag 1992
- [24] Gohl/Toroja Eisenbahnen der Welt, Mitteleuropa, ER-Verlag, 1991
- [25] Grieder, K. Berühmte Züge und Lokomotiven, Orell Füssli, Zürich, 1987
- [26] Grimm, R. Kraftschlussausnutzung einer Lokomotive mit Zug-Druck-Stangen, Diss. TU Darmstadt, Shaker Verlag, 2001
- [27] Hinkel/Treiber/Valenta U-Bahnen - Gestern - Heute - Morgen, Compress Verlag, Wien, 1993
- [28] Hackmann, W. Systemvergleich unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienenverkehr: Asynchronmaschine, permanenterregte Synchronmaschine, Transversalflussmaschine, Diss. TU Darmstadt, 2003
- [29] Hartung, K. Lokomotiven und Wagen 1, Schweizer Fahrzeug-Archiv, transpress, Berlin, 1993
- [30] Hartung, K. Lokomotiven und Wagen 2, Schweizer Fahrzeug-Archiv, transpress, Berlin, 1993
- [31] Henneberger, G. Elektrische Bahnen, Linearantriebe und Magnetschwebesysteme, Vorlesungsskriptum, RWTH- Aachen, 2002
- [32] Henschel Henschel Lokomotiven von 1848 bis zum Intercity, Bechtermünz Verlag, 1995
- [33] Hinkel/Treiber et al. U-Bahnen gestern, heute, morgen, Compress Verlag, 1993
- [34] Hochbruck, H. Jahrbuch des Bahnwesens, 48. Folge, Hestra-Verlag, 1998
- [35] Hollingsworth et al. Das Handbuch der Lokomotiven, Weltbild Verlag, Augsburg 1996



11 Literaturverzeichnis

- [36] Holzborn, I. u. K. Kleine Typenkunde deutscher Triebfahrzeuge, transpress, 1999
- [37] Horn, A. ÖBB Handbuch 1993, Bohmann Verlag, Wien, 1993
- [38] Horn, A. ÖBB Handbuch 1995, Bohmann Verlag, Wien, 1995
- [39] Horn, A. ÖBB Handbuch 1997, Bohmann Verlag, Wien, 1997
- [40] Horn, A. ÖBB Handbuch 1999, Bohmann Verlag, Wien, 1999
- [41] Jöckel, A. Aktive Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang von Triebfahrzeugen auf der Grundlage vom Systemmodellierung und Betriebsmessungen, Diss. TU Darmstadt 1999
- [42] Kademann et al. Henschel Lokomotiven, Bechtermünz Verlag, Augsburg, 1995
- [43] Kießling/Puschmann/.Fahrleitung elektrischer Bahnen, B.G.Teubner Stuttgart - Leipzig, 1998
- [44] Körner, O. Mechanische Antriebskonzepte für Hochleistungs-Drehstrom-Lokomotiven, Diss. TU Darmstadt, Shaker Verlag, 2004
- [45] Kortüm, W. Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen, Springer Verlag Berlin, 1994
- [46] Kosak/Isenberg Die Supereisenbahnen der Welt, Falken
- [47] Kraus, H. Grundlagen elektr. Bahnen, 1.Auflage, Werner-Verlag 1986
- [48] Kure, G. Steyr Wälzlager in elektr. Fahrmotoren für Schienenfahrzeuge, Nr. 3.4D, 1990
- [49] Matthes, M. Die Chemnitzer Straßenbahn, GeraMond, 1. Auflage, München 1998
- [50] Mehlretter, J.M. Elektrische Triebfahrzeuge, Motorbuch Verlag Stuttgart, 1986
- [51] Menz, U. Einsatz von Schwungmassenspeichern in Straßenbahnnetzen, Diss. TU Darmstadt 2002
- [52] Messerschmidt, W. Güterzuglokomotiven, Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1992



11 Literaturverzeichnis

- [53] Messerschmidt, W. Bilddokumente der elektr. Lokomotive, Motorbuch Verlag, Stuttgart, 1987
- [54] Meyer, Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik, Vorlesungsskriptum TU-D, 2003
- [55] Menz, U. Einsatz von Schwungmassenspeichern in Straßenbahnnetzen, Shaker Verlag, 2002
- [56] Müller, S. Elektrische und dieselektrische Triebfahrzeuge, Birkhäuser Verlag, 1979
- [57] Neudorfer, H. Besonderheiten bei der Auslegung von Bahnmotoren, DA, TU- Wien, 1986
- [58] Neudorfer, H. Thermische Untersuchung und Berechnung eines flüssigkeitsgekühlten Traktionsmotors mit Getriebeölwellenkühlung, Diss., TU-Wien, 1998
- [59] Neudorfer, H. Bahnmotor EM 1001 - WM1301 Studienarbeit, TU - Wien, 1987
- [60] Neudorfer, H. Flüssigkeitsgekühlte Traktionsmotoren, Glasers Annalen
- [61] Niel, A. Vom Dampfroß zur E-Lok, Verlag Styria, Graz, 1987
- [62] Navé/Luft Die Semmeringbahn, Orell Füssli, Zürich, 1985
- [63] Obermayer, H. Internationaler Schnellverkehr, Franckh-Kosmos Verlag, 1994
- [64] Pachl, J. Systemtechnik des Schienenverkehrs, B.G Teubner Stuttgart-Leipzig, 1999
- [65] Pabst, M. U- und S- Bahnfahrzeuge in Deutschland, GeraMond, München, 1. Auflage, 2000
- [66] Pabst, M. Straßenbahnfahrzeuge, Band 1, GeraMond, München, 1. Auflage, 1998
- [67] Preuß, E. Kursbuch des Schreckens, Transpress Verlag, 1998
- [68] Rahn/Hochbruck/... ICE Zug der Zukunft, Hestra Verlag, 1991
- [69] Reiners, J. Loks der DB AG, Transpress Verlag, 2010
- [70] Riechers, D. ICE Neue Züge für Deutschlands Schnellverkehr, Transpress Verlag, 2001



11 Literaturverzeichnis

- [71] Riechers, D. Metros in Europa, Transpress Verlag, 1995
- [72] Rießberger, K. Glasers Annalen ZEVrail, Tagungsband Sonderheft Moderne Schienenfahrzeuge, Georg Siemens Verlag, 2007
- [73] Rose, H. Lexikon der Lokomotive, Transpress Verlag, 1992
- [74] Rossberg, R. Geschichte der Eisenbahn, Sigloch Verlag,
- [75] Rotter/Petrovitsch Triebfahrzeuge österreichischer Eisenbahnen, Alba, 1990
- [77] Sachs, K. Elektrische Triebfahrzeuge, Band 1 – 3, Springer Verlag, 1973
- [77] Schefold, U. 150 Jahre Eisenbahn in Österreich, Südwest Verlag, 1986
- [78] Schönborn, H. Lok 2000, GeraMond Verlag, 1998
- [79] Siemens diverse Unterlagen
- [80] Slezak, J.O. Die Lokomotiven der Republik Österreich, Verlag Josef Otto Slezak, Wien 1973
- [81] Steimel, A. Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2004
- [82] Stockklausner, J. Wechselstrom-Lokomotiven, Band 1 (1910-1952), Slezak, Wien 1983
- [83] Stolz, Th. Taschenlexikon Triebfahrzeuge der Schweiz, Minirex, Luzern, 1999
- [84] Teich, W. BBC- Drehstrom-Antriebstechnik, Brown Boveri AG Mannheim, 1987
- [85] Temming, R. Eisenbahn für morgen schon heute, Kaiser, Klagenfurt, 1990
- [86] Temming, R. Große Züge, Kaiser, Klagenfurt, 1991



11 Literaturverzeichnis

- [87] Traktionssysteme
Austria diverse Unterlagen
- [88] Von Hornstein, A. Schienen-Triebfahrzeuge und Wagen aus aller Welt, Füssli Verlag, 1991
- [89] Wagner, G. Die Deutsche Bundesbahn, Weltbild Verlag, Augsburg, 1990
- [90] Wagner, G. Die Österreichischen Bundesbahnen, Weltbild Verlag, Augsburg, 1990
- [91] Wanek-Pusset, P. Einführung in die Schienenfahrzeugtechnik, Vorlesungsskript
FH Joanneum, Graz, 1999
- [92] Weber, Kühne, R.. Alpenbahnen, Transpress Verlag, 2014
- [93] Werle, T. Bemessung und Vergleich von Linear-Boostern für den Einsatz bei elektrischen
Bahnen, Shaker Verlag, 2003
- [94] Wende, D. Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, Stuttgart, 2003
- [95] Zschech, R. Akku- und Elektrotriebwagen, transpress, Berlin, 1992
- [96] Zimmert, G. Grundlagen der Energieversorgung elektrischer Bahnen,
Vorlesungsskript TU Darmstadt, 2000
- [97] Balfour Beatty
Rail diverse Unterlagen
- [98] Binder, A. Neue Technologien für Elektrische Energiewandler, Vorlesungsskript TU Darmstadt,
2013



12 Wiederholungsfragen

Bei den Wiederholungsfragen sind auch auf alle dazugehörigen Aspekte wie Vor- und Nachteile, Diagramme, Formeln, Prinzipskizzen und Erklärungen einzugehen.

- 1) Vor - und Nachteile der elektrischen Traktion
- 2) Elektrifizierungsmotivation Kostenvergleich Dieseltraktion - elektr. Traktion
- 3) Bahnstromsysteme (Spannung, Frequenz, Anwendung, Länder), Vor- und Nachteile
- 4) Spurweiten, Radsatzlasten und Radreifendurchmesser
- 5) Fahrdiagramm, Haltestellenabstand, Geschwindigkeiten von Triebfahrzeugen
- 6) Fahrwiderstände (Arten, Berechnungsformeln)
- 7) Kraftübertragung Rad - Schiene, Haftwerte
- 8) Z-v Diagramm, B-v-Diagramm und Zugkraftgleichung
- 9) Bezeichnung der Achsfolge von Triebfahrzeugen
- 10) Zugkonzepte, Zugkonfigurationen
- 11) Prinzip der Radsatzentlastung
- 12) Übersicht von Antriebskonzepten
- 13) Tatzlagerantrieb
- 14) Kardantrieb, Gruppenantrieb
- 15) Übersicht der Bremskonzepte, Bremsweg eines Zuges
- 16) Magnetschienenbremse, Wirbelstrombremse
- 17) Prinzip eines dieselektrischen Triebfahrzeuges (Vor- und Nachteile)
- 18) Hauptstromkreise Gleich- und Wechselstromtriebfahrzeuge



12 Wiederholungsfragen

- 19) Konzepte der Antriebssysteme bei Gleichstromversorgung
- 20) Konzepte der Antriebssysteme bei Wechselstromversorgung
- 21) Bahnstromversorgung, Oberleitung, Stromabnehmer
- 22) Transformator
- 23) Widerstände (Haupteinsatzgebiet, Anforderungen der Werkstoffe, Aufbau)
- 24) Stromrückführung
- 25) Magnetschwebbahn Prinzip, Vor- und Nachteile
- 26) Übersicht Leistungssteuerung
- 27) Leistungssteuerung bei Gleichstromtriebfahrzeugen
- 28) Leistungssteuerung bei Wechselstromtriebfahrzeugen
- 29) Übersicht Traktionsmaschinen
- 30) Gleichstrommaschine, Einphasenwechselstrommaschine
- 31) Drehstromasynchronmaschine
- 32) Drehstromsynchronmaschine
- 33) Traktionsgenerator (konventionell und permanenterregt)
- 34) Direktantriebe (Radnabenmotoren)
- 35) Flüssigkeitsgekühlte Traktionsmaschinen (Vor- und Nachteile)
- 36) Übersicht Überwachungseinrichtungen
- 37) Sicherheitsfahrschaltung Sifa
- 38) Zugbeeinflussung Indusi, LZB



12 Wiederholungsfragen

- 39) European Train Control System ETCS
- 40) Bahnenergieversorgungssysteme allgemein (Hauptelemente)
- 41) BEVS Besonderheiten im Vergleich zu sonstigen Energieversorgungssystemen
- 42) Fahrleitungssysteme Übersicht (Vor- und Nachteile, Kettenwerke,...)
- 43) Wellenausarbeitungsgeschwindigkeit (Einflussparameter)
- 44) Schaltanlagen und Unterwerke AC-Systeme und DC-System
- 45) Probleme der Erdung und Rückstromführung bei AC-Systemen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Tel: 0043-2252 521 591

Handy: 0043-676 50 42 721

e-mail: prof.dr.dr.neudorfer@emdrive.at
hneudorfer@ew.tu-darmstadt.de
harald.neudorfer@tuwien.ac.at

Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger

Staatlich befugter und beeideter Ziviltechniker für Elektrotechnik

Professor an der **TU - Darmstadt** und Lehrbeauftragter an der **TU - Wien**

